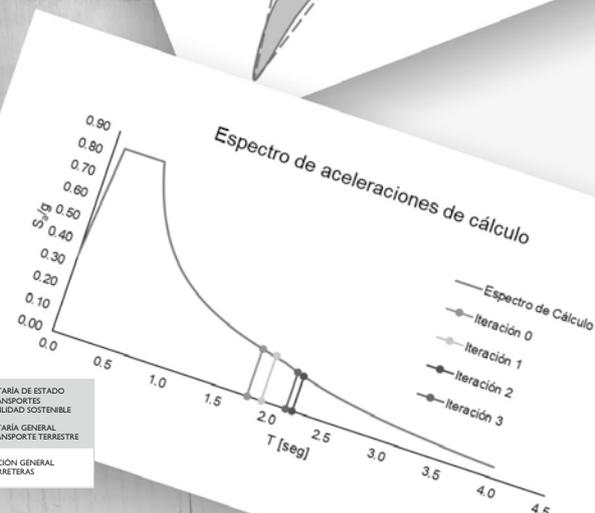
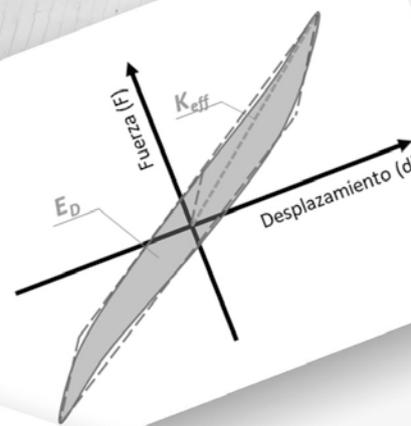


Guía para el cálculo de aisladores elastoméricos de bajo amortiguamiento en zona sísmica. Ejemplo de aplicación



SERIE GUÍAS EUROCÓDIGOS

Guía para el cálculo de aisladores elastoméricos de bajo amortiguamiento en zona sísmica. Ejemplo de aplicación



2025

Centro virtual de publicaciones del Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible:

<https://publicaciones.transportes.gob.es>

Catálogo de publicaciones de la Administración General del Estado:

<https://cpage.mpr.gob.es>

Edita:

© Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible

Secretaría General Técnica

Centro de Publicaciones

NIPOe:196-25-049-8

NIPO: 196-25-048-2

Depósito legal: M-13673-2025

Impreso en papel con gestión forestal certificada.

PREÁMBULO

Los Eurocódigos Estructurales

La Comisión Europea puso en marcha en 1971 la redacción de un código estructural europeo común que culminó con la aparición en 1984 de unos textos que constituyen el embrión de los actuales Eurocódigos. La evolución desde esos primeros textos hasta los vigentes ha sido muy significativa, no sólo en su contenido, sino en el grado de aceptación y reconocimiento por parte de la comunidad técnica europea y mundial.

En la década de los 90, el Comité Europeo de Normalización (CEN) elaboró, por mandato de la Comisión Europea, un nuevo conjunto de Eurocódigos, que se publicaron con carácter experimental (normas ENV). Fue entre los años 2002 y 2007, cuando tuvo lugar la aparición de los Eurocódigos Estructurales, en la versión que actualmente conocemos, como normas EN (normas UNE-EN en España).

En 2015, se inician los trabajos de redacción de la denominada 2.^a generación de Eurocódigos, con el objeto de incorporar un conjunto de mejoras relevantes después de más de una década de uso. Los textos finales de estas normas están disponibles desde 2022 y deben pasar por un proceso de aprobación con participación de todos los países europeos, que se extenderá hasta 2025, año en que la 1.^a generación de Eurocódigos quedará derogada.

La aplicación de los Eurocódigos

Aunque los Eurocódigos tienen carácter voluntario por tratarse de normas EN, progresivamente se han ido convirtiendo en el código estructural único en Europa y su cumplimiento es exigido en la práctica totalidad de los países europeos, bien por vía reglamentaria o bien de forma contractual.

Hay que destacar que sucesivas directivas y recomendaciones de la Unión Europea han hecho referencia expresa a los Eurocódigos y a la importancia de su adopción por los Estados miembros, como forma de «facilitar la provisión de servicios en el campo de la construcción creando un sistema armonizado de reglas generales». Dice también la Comisión Europea

que los Estados miembros «deben reconocer que, en el caso de las obras de construcción proyectadas con los métodos de cálculo descritos en los Eurocódigos, existe una presunción de conformidad con el requisito esencial de resistencia mecánica y estabilidad» (DOUE, 19 de diciembre de 2003).

Además, en el caso de los proyectos de obras públicas, la Directiva de Contratación Pública, transpuesta al ordenamiento jurídico español por la Ley de Contratos del Sector Público, establece la preeminencia de las normas nacionales que incorporan normas europeas (UNE-EN, en el caso español) sobre cualquier otra especificación técnica nacional. En aplicación de dicha ley, la Dirección General de Carreteras exige desde el año 2019 la aplicación de los Eurocódigos en los proyectos de estructuras y obras geotécnicas de la Red de Carreteras del Estado (Orden Circular 1/2019, de fecha de 18 de marzo de 2019).

La serie Guías Eurocódigos

El uso creciente y generalizado de los Eurocódigos en los países de nuestro entorno ha dado lugar a la publicación de numerosos manuales, guías y ejemplos de aplicación de estas normas. En España, desde hace ya bastantes años, los Eurocódigos se han convertido en textos de referencia en la enseñanza universitaria y han ido apareciendo publicaciones diversas relativas a los mismos, entre las que cabe citar algunos números monográficos en revistas especializadas.

La serie denominada Guías Eurocódigos que aquí se presenta es una iniciativa pionera en nuestro país. Su objeto es contribuir a que la comunidad técnica española tenga un conocimiento más profundo de los distintos Eurocódigos y, en última instancia, facilitar su aplicación en los proyectos de la Dirección General de Carreteras.

La serie está planteada como un conjunto abierto de publicaciones que irá creciendo en función de las necesidades de aclaración que puedan surgir a la hora de aplicar los Eurocódigos.

En su elaboración se ha supuesto que el lector está familiarizado con los Eurocódigos correspondientes y es conocedor de los conceptos ingenieriles en los que se sustentan. Para evitar en lo posible la repetición de cláusulas, las guías necesitarán ser leídas junto con los propios Eurocódigos y con sus respectivos anejos nacionales españoles.

Las normas UNE están sujetas a derecho de propiedad intelectual por parte de la Asociación Española de Normalización. Esta guía reproduce parcialmente el contenido de algunas normas UNE-EN por acuerdo con dicha Asociación.

La Guía para el cálculo de aisladores elastoméricos de bajo amortiguamiento en zona sísmica según la UNE EN 15129. Ejemplo de aplicación

A lo largo de varias décadas, en España, para el dimensionamiento de apoyos elastoméricos en proyectos de puentes de carretera se ha tenido como referencia el documento *Recomendaciones para el proyecto y puesta en obra de los apoyos elastoméricos para puentes de*

carretera de la Dirección General de Carreteras (año 1982), en adelante, *Recomendaciones de 1982*. Actualmente, y desde la entrada en vigor de la Orden Circular 1/2019, las estructuras de la Red de Carreteras del Estado deben proyectarse con los Eurocódigos y normas asociadas. La norma de referencia para el dimensionamiento de apoyos estructurales según los Eurocódigos es la UNE-EN 1337, estando el dimensionamiento de los apoyos elastoméricos recogido en su parte 3 (UNE-EN 1337-3). La norma de referencia para el dimensionamiento de apoyos elastoméricos como aisladores sísmicos de bajo amortiguamiento según los Eurocódigos es la UNE-EN 15129.

Como todos los apoyos elastoméricos, los aisladores sísmicos elastoméricos deben cumplir con todos los límites de deformación y estabilidad establecidos por la norma UNE-EN 1337-3 para las combinaciones de acciones no sísmicas, así como sus requisitos de conformidad. Así mismo, frente a combinaciones sísmicas, deben cumplir con los límites de deformación y estabilidad establecidos por la norma UNE-EN 15129, así como con los criterios de cálculo complementarios establecidos por la parte 2, Puentes, del Eurocódigo 8 (UNE-EN 1998-2). Tan importante como el cumplimiento de los límites de cálculo definidos por la norma, es la garantía de que el aislador y los materiales que lo componen cumplen con los requisitos de conformidad que garantizan que sus propiedades de funcionamiento son equivalentes a las utilizadas para su cálculo estructural. En la *Guía para el cálculo de aisladores elastoméricos de bajo amortiguamiento en zona sísmica* [20] se recogen los requisitos de conformidad exigidos para los apoyos completos y sus materiales constituyentes, así como las comprobaciones necesarias para el dimensionamiento de los aisladores. Como complemento a dicha guía, en la *Guía para el cálculo de aisladores elastoméricos de bajo amortiguamiento en zona sísmica. Ejemplo de aplicación*, se desarrolla un ejemplo práctico. Ambas guías son complementarias a la *Guía para el cálculo de apoyos elastoméricos* [18] y a su guía de ejemplo [19], estableciendo frecuentes referencias a las mismas.

Todas las referencias a la norma UNE-EN 1337-3 contenidas en esta guía corresponden a su versión UNE-EN 1337-3:2005, vigente a la fecha de redacción de este documento. Todas las referencias a la norma UNE-EN 15129 contenidas en esta guía corresponden a su versión UNE-EN 15129:2019, vigente a la fecha de redacción de este documento, basada en EN 15129:2018. Todas las referencias a la norma UNE-EN 1998 contenidas en esta guía corresponden a su versión UNE-EN 1998-1:2018 y UNE-EN 1998-2:2018.

La *Guía para el cálculo de aisladores elastoméricos de bajo amortiguamiento en zona sísmica. Ejemplo de aplicación* ha sido redactada por Álvaro Serrano Corral y Guillermo Blanco Fernández (MC2 Estudio de Ingeniería), con la colaboración de Amadeo Benavent Climent (catedrático de Estructuras en la Universidad Politécnica de Madrid) y la participación de Miguel Ortega Cornejo y Maria João Freitas (TYLin Spain), bajo la coordinación de Pilar Crespo Rodríguez por parte de la Dirección General de Carreteras.

ÍNDICE

1 INTRODUCCIÓN	11
1.1 Objeto y ámbito de aplicación.....	11
1.2 Contenido de la guía.....	12
2 TÉRMINOS, DEFINICIONES, SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS	13
2.1 Normativas de consulta y aplicación	13
2.2 Términos y definiciones.....	14
2.3 Símbolos	16
2.3.1 Símbolos de UNE-EN 15129.....	16
2.3.1.2 Letras latinas en minúsculas	18
2.3.1.3 Letras griegas	19
2.3.2 Símbolos de UNE-EN 1337-3.....	20
2.3.2.1 Letras latinas en mayúsculas.....	20
2.3.2.2 Letras latinas en minúsculas.....	21
2.3.2.3 Letras griegas	21
2.3.3 Símbolos de UNE-EN 1998.....	21
2.3.3.1 Letras latinas en mayúsculas.....	21
2.3.3.2 Letras latinas en minúsculas	22
2.3.3.3 Letras griegas	23
2.3.4 Símbolos particulares a efectos de esta guía.....	23
2.3.4.1 Letras latinas en mayúsculas.....	23
2.3.4.2 Letras latinas en minúsculas	25
2.3.4.3 Letras griegas	26
2.3.4.4 Símbolos representativos de acciones	27
2.3.5 Notaciones y términos equivalentes entre normativas.....	28
2.4 Abreviaturas.....	30
3 CONSIDERACIONES GENERALES Y DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA.....	33
3.1 Consideraciones generales.....	33
3.2 Descripción de la estructura.....	33
4 ACCIONES, COMBINACIONES CONSIDERADAS PARA EL CÁLCULO Y PROPIEDADES DE CÁLCULO	37
4.1 Acción sísmica.....	37
4.2 Acciones no sísmicas.....	39

4.2.1	Cargas permanentes.....	39
4.2.2	Pretensado.....	40
4.2.3	Sobrecargas de uso.....	40
4.2.4	Viento.....	42
4.2.5	Térmico.....	42
4.2.6	Resumen de efectos de las acciones no sísmicas en situación sísmica	43
4.3	Combinaciones de acciones en situación sísmica, efectos y comprobaciones de Estado Límite Último.....	46
4.3.1	Combinación de acciones en situación sísmica y efectos de las mismas....	47
4.3.2	Selección de hipótesis más desfavorables para el cálculo de los aisladores en estribos.....	50
4.3.3	Selección de hipótesis de cálculo más desfavorables para el cálculo de los aisladores en pilas.....	57
4.3.4	Consideración de aislador elastomérico sometido a acciones sísmicas pequeñas.....	63
5	PROPIEDADES DE CÁLCULO	65
5.1	Parámetros geométricos.....	65
5.1.1	Parámetros de dimensión de los componentes de los aisladores elastoméricos.....	65
5.1.2	Área total, A , área efectiva, A' y A_I , y área efectiva reducida, A_r , del apoyo.....	67
5.1.3	Factor de forma, S	67
5.2	Módulo de elasticidad transversal, G	68
5.2.1	Propiedades nominales de G	68
5.2.2	Variabilidad de propiedades.....	69
5.2.2.1	Variabilidad de las propiedades para verificar los aisladores elastoméricos como "sencillos" según UNE-EN 1998-2.....	71
5.3	Módulo de compresión, E_c	71
5.4	Rigidez y amortiguamiento efectivo.....	72
5.5	Rigidez de la estructura para el cálculo sísmico.....	74
5.6	Masa de la estructura para el cálculo sísmico.....	75
6	METODOLOGÍA DE CÁLCULO	77
6.1	Método espectral basado en el modo fundamental.....	77
6.2	Método espectral multimodal.....	79
7	RESUMEN DE COMPROBACIÓN DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO EN ESTADO LÍMITE ÚLTIMO SEGÚN UNE-EN 15129 Y UNE-EN 1998-2.....	81
7.1	Desplazamiento horizontal máximo total d_{max}	82
7.2	Deformación tangencial máxima de cálculo en situación sísmica, $\varepsilon_{t,d}$	86

7.3	Deformación de tracción máxima y no levantamiento.....	88
7.4	Estabilidad a pandeo o flexión lateral bajo acciones sísmicas.....	88
7.5	Estabilidad de rodamiento bajo acciones sísmicas.....	89
7.6	Espesor mínimo de las placas de zunchado de acero	90
8	COMPROBACIÓN SÍSMICA DE AISLADORES DIMENSIONADOS COMO APOYOS ELASTOMÉRICOS SEGÚN UNE-EN 1337-3	91
8.1	Dimensionamiento de los aisladores elastoméricos según UNE-EN 1337-3	92
8.2	Respuesta de los aisladores frente a las acciones no sísmicas en situación sísmica.....	95
8.3	Respuesta de los aisladores frente a la acción sísmica empleando el método del modo fundamental.....	99
8.3.1	Análisis detallado de la respuesta con propiedades DP.....	100
8.3.1.1	Respuesta en desplazamientos para verificar los aisladores elastoméricos como "sencillos" según UNE-EN 1998-2	104
8.3.2	Análisis resumido de la respuesta con propiedades UBDP y LBDP.....	104
8.4	Análisis de viabilidad del uso de los apoyos elastoméricos como aisladores sísmicos utilizando la respuesta sísmica obtenida con el método del modo fundamental.....	106
8.4.1	Viabilidad de los aisladores elastoméricos con propiedades DP	106
8.4.1.1	Viabilidad de los apoyos elastoméricos como aisladores LDRB "sencillos" según UNE-EN 1998-2	106
8.4.1.2	Viabilidad de los apoyos elastoméricos como aisladores LDRB que se consideran sometidos a "acciones sísmicas pequeñas" según UNE-EN 15129 y UNE-EN 1998-2	107
8.4.1.3	Viabilidad de los apoyos elastoméricos como aisladores LDRB según UNE-EN 15129 y UNE-EN 1998-2	107
8.4.2	Viabilidad de los aisladores elastoméricos con propiedades UBDP y LBDP.....	108
8.4.3	Conclusiones relativas a la viabilidad del uso de los apoyos elastoméricos como aisladores sísmicos	110
9	DIMENSIONAMIENTO SÍSMICO DE AISLADORES ELASTOMÉRICOS SEGÚN UNE-EN 15129 Y UNE-EN 1998-2	111
9.1	Pre-dimensionamiento de los aisladores elastoméricos.....	113
9.1.1	Pre-dimensionamiento del área en planta de los aisladores elastoméricos según UNE-EN 1337-3.....	114
9.1.1.1	Pre-dimensionamiento en planta de los aisladores de estribos...	114
9.1.1.2	Pre-dimensionamiento en planta de los aisladores de pilas	116
9.1.2	Pre-dimensionamiento del espesor total de material elastómero, T_q , empleando únicamente los desplazamientos sísmicos calculados con el método del modo fundamental.....	117

9.2	Respuesta de los aisladores frente a las acciones no sísmicas en situación sísmica y tensiones tangenciales máximas totales, $\varepsilon_{q,max}$	123
9.3	Viabilidad de los aisladores elastoméricos con propiedades DP, UBDP y LBDP	126
9.3.1	Viabilidad de los aisladores como LDRB "sencillos" según UNE-EN 1998-2	127
9.3.2	Viabilidad de los aisladores como LDRB que se consideran sometidos a "acciones sísmicas pequeñas" según UNE-EN 15129 y UNE-EN 1998-2	128
9.4	Comprobación de los aisladores sísmicos utilizando la respuesta sísmica obtenida con el método espectral multimodal.....	129
9.4.1	Definición de los aisladores sísmicos.....	129
9.4.2	Consideración de la variabilidad de las propiedades del elastómero en el método espectral multimodal.....	132
9.4.3	Fuerzas y desplazamientos de cálculo.....	133
9.4.3.1	Fuerzas de dimensionamiento de la subestructura.....	135
9.4.3.2	Fuerzas de dimensionamiento de los anclajes de los aisladores	136
9.4.4	Límites inferiores de d_{cd} y V_{cd} para el método espectral multimodal.....	137
9.4.5	Comprobaciones de dimensionamiento	138
9.4.5.1	Comprobación paso a paso de los aisladores con propiedades nominales frente a la hipótesis de cálculo III	138
9.4.5.2	Comprobación completa de los aisladores frente a todas las hipótesis de cálculo	145
9.5	Discusión sobre la consideración $d_{max,Tot}$ para la comprobación de los aisladores.....	149
10	EJEMPLO DE PLANO DE DEFINICIÓN DE AISLADORES ELASTOMÉRICOS A INCLUIR EN EL PROYECTO.....	153
11	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	159

1

INTRODUCCIÓN

1.1 Objeto y ámbito de aplicación

Esta guía tiene como objeto facilitar la aplicación de la norma UNE-EN 15129 al proyecto de obras de construcción en España, contribuyendo, además, a complementar la norma UNE-EN 1337-3, para la utilización de apoyos elastoméricos convencionales como aisladores sísmicos de bajo amortiguamiento. Como todos los apoyos elastoméricos, los aisladores sísmicos elastoméricos deben cumplir con todos los límites de deformación y estabilidad establecidos por la norma UNE-EN 1337-3 para las combinaciones de acciones no sísmicas. Así mismo, frente a combinaciones sísmicas deben cumplir con los límites de deformación y estabilidad establecidos por la norma UNE-EN 15129, así como con los criterios de cálculo complementarios establecidos por la parte 2, Puentes, del Eurocódigo 8 (UNE-EN 1998-2). Con esta guía se busca complementar el contenido teórico de la *Guía para el cálculo de aisladores elastoméricos de bajo amortiguamiento en zona sísmica* [20], proporcionando ejemplos e indicaciones prácticas para el proyecto sísmico de puentes con aisladores elastoméricos de bajo amortiguamiento.

Esta guía se aplica a apoyos elastoméricos de bajo amortiguamiento ($\xi_{eff} \leq 6\%$) según UNE-EN 15129, para uso en temperaturas de operación en el intervalo de -25 °C a $+50\text{ °C}$ y en cortos periodos de hasta $+70\text{ °C}$, y no cubre apoyos elastoméricos fabricados con otros materiales elastoméricos que no tengan el caucho natural (NR) o caucho de neopreno (CR) como polímero base. No es aplicable a apoyos cuya función principal sea transmitir momentos, apoyos que resistan levantamientos, apoyos de puentes móviles o articulaciones de hormigón armado. Como UNE-EN 15129 y UNE-EN 1337-3, esta guía es aplicable a aisladores elastoméricos con o sin dispositivos complementarios, sísmicos o no sísmicos, que permitan extender su campo de aplicación.

Las comprobaciones incluidas a lo largo de este documento corresponden a aisladores elastoméricos de bajo amortiguamiento (LDRB) según UNE-EN 15129, rectangulares o circulares en planta, no deslizantes. No forman parte del contenido los correspondientes a la designación de apoyos elastoméricos "sencillos" de bajo amortiguamiento, del apartado 7 de UNE-EN 1998-2,

si bien, a lo largo de la guía, se comentarán las diferencias de estos con los aisladores que cumplen UNE-EN 15129. No incluye apoyos planos sin burbujas ni apoyos de tira. Tampoco incluye aisladores elastoméricos de gran amortiguamiento (HDRB, LRB o PPRB). Para otros tipos o formas de apoyos, se deberán consultar las normas UNE-EN 15129 y UNE-EN 1337-3. La verificación de apoyos afectados frente a acciones no sísmicas se deberá realizar según UNE-EN 1337-3 y la *Guía para el cálculo de apoyos elastoméricos* de la Dirección General de Carreteras [18] y su guía complementaria de ejemplo [19].

1.2 Contenido de la guía

Esta guía se estructura en nueve capítulos. En el primer capítulo, Introducción, se explica el objeto, ámbito y contenido del documento; en aras de una mayor claridad del documento, en el capítulo 2, Términos, definiciones, símbolos y abreviaturas, se recoge, además, la definición de todos los símbolos y abreviaturas empleados en su redacción.

En el capítulo 3 se realiza una descripción detallada del puente que sirve como ejemplo para realizar las comprobaciones de los aisladores sísmicos. Este puente es el mismo que se utiliza en la *Guía para el cálculo de apoyos elastoméricos. Ejemplo de aplicación* [19], con la diferencia de que se considera emplazado en una de las zonas de mayor sismicidad de España.

Las bases de cálculo se desarrollan a lo largo de los capítulos 4, 5 y 6. En el capítulo 4 se definen las acciones y combinaciones de cálculo e hipótesis que se van a considerar en la guía para el dimensionamiento y comprobación de los aisladores. Las propiedades de cálculo de la estructura y de los aisladores se detallan en el capítulo 5. En el capítulo 6 se realiza un breve resumen de la metodología que se va a utilizar para la comprobación sísmica de los aisladores del puente.

En el capítulo 7 se realiza un resumen de las comprobaciones que se deben realizar a los aisladores para cumplir con UNE-EN 15129. Se puede encontrar un desarrollo más detallado de estas comprobaciones en la *Guía para el cálculo de aisladores elastoméricos de bajo amortiguamiento en zona sísmica* [20].

En el capítulo 8 se procede a comprobar con los criterios de UNE-EN 15129 los apoyos dimensionados según UNE-EN 1337-3 en la *Guía para el cálculo de apoyos elastoméricos. Ejemplo de aplicación* [19]. Se demuestra que estos apoyos no cumplen con los requerimientos de UNE-EN 15129 en un emplazamiento sísmico del puente, por lo que en el capítulo 9 se realiza un nuevo dimensionamiento que sí cumpla con UNE-EN 15129 y que, además, reduzca las fuerzas en la subestructura como parte de una estrategia sismorresistente. Estos últimos aisladores se reflejan en el capítulo 10 mediante planos tipo de un proyecto que incluya aisladores elastoméricos.

Finalmente, en el capítulo 11 se incluyen las referencias bibliográficas o citas a las que referencia la guía.

2

TÉRMINOS, DEFINICIONES, SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

2.1 Normativas de consulta y aplicación

La presente guía agrupa y resume, con orientación al proyecto, el contenido de referencia incluido en las siguientes normativas:

- UNE-EN 15129: Dispositivos antisísmicos
- UNE-EN 1998: Eurocódigo 8. Proyecto de estructuras sismorresistentes. Fundamentalmente sus partes 1 y 2
- UNE-EN 1337-1: Reglas generales de proyecto
- UNE-EN 1337-3: Apoyos estructurales elastoméricos

Dichas normas complementan su contenido mediante la aplicación de las siguientes normativas adicionales de interés:

- UNE-EN 1990:2002: Eurocódigos. Bases de cálculo de estructuras
- UNE-EN 1991: Eurocódigo 1. Acciones en estructuras
- UNE-EN 1998: Eurocódigo 8. Proyecto de estructuras sismorresistentes. Partes 3, 4 y 5
- UNE-ISO 34: Elastómeros. Caucho, vulcanizado o termoplástico. Determinación de la resistencia al desgarro
- UNE-ISO 48: Elastómeros, vulcanizados o termoplásticos. Determinación de la dureza (dureza entre 10 IRHD y 100 IRHD)

- UNE-ISO 188: Elastómeros, vulcanizados o termoplásticos. Envejecimiento acelerado y ensayos de resistencia al calor
- UNE-ISO 815: Caucho, vulcanizado o termoplástico. Determinación de la deformación remanente por compresión a deformación constante
- ISO 1431-1: Caucho vulcanizado o termoplástico. Resistencia al agrietamiento por ozono. Parte 1: Ensayo de deformación en condiciones estáticas y dinámicas
- UNE-ISO 4664: Caucho, vulcanizado o termoplástico. Determinación de las propiedades dinámicas
- UNE-EN 10025: Productos laminados en caliente de aceros para estructuras
- ISO 22762: *Elastomeric seismic-protection isolators*
- ISO 14737: *Carbon and low alloy cast steels for general applications*

2.2 Términos y definiciones

Para los fines de este documento, se aplican los términos y definiciones siguientes:

- *Aislamiento sísmico*: estrategia de proyecto sismorresistente consistente en disponer dispositivos apropiados a un determinado nivel de la estructura para aislar la masa de la estructura por encima de este nivel (superestructura) de la estructura situada por debajo (subestructura), modificando así las propiedades dinámicas de la estructura y con ello la respuesta frente a un sismo.
- *Apoyo*: elemento utilizado para permitir, según los casos, la rotación entre dos miembros de una estructura y transmitir las cargas definidas en las especificaciones aplicables, así como para evitar los desplazamientos (apoyos fijos), permitir los desplazamientos en una sola dirección (apoyos guiados) o en todas direcciones de un plano (apoyos libres).
- *Aislador*: dispositivo que posee las características necesarias para realizar el aislamiento sísmico.
- *Apoyo elastomérico*: apoyo fabricado con materiales elastómeros, placas de acero de zunchado interiores y que puede tener adicionalmente placas de extremo. En esta guía se va a utilizar el término "apoyos elastoméricos" para referirse a los apoyos de este tipo dimensionados según UNE-EN 1337-3 y que pueden no cumplir con los requisitos de UNE-EN 15129 y UNE-EN 1998-2 para ser considerados como aisladores elastoméricos.
- *Aislador elastomérico*: apoyo fabricado con materiales elastómeros, placas de zunchado interiores y placas de extremo, de acero, comprobados o diseñados con características especiales para cumplir funciones de aislamiento y de disipación de la

energía introducida por un sismo mediante amortiguamiento. En esta guía se va a utilizar el término "aislador elastomérico" para referirse a aquellos apoyos elastoméricos que cumplen con los requisitos de UNE-EN 15129 y UNE-EN 1998-2 para ser considerados como aisladores elastoméricos.

- *Interfaz de aislamiento*: superficie que separa la superestructura aislada de la subestructura.
- *Superestructura*: parte de la estructura que está aislada y situada por encima de la interfaz de aislamiento.
- *Subestructura*: parte de la estructura que está situada por debajo de la interfaz de aislamiento y que tiene continuidad estructural hasta los cimientos.
- *Desplazamiento de cálculo, d_{bd}* : desplazamiento total (debido a traslaciones y rotaciones) relativo entre las placas de extremo de un aislador elastomérico cuando el sistema estructural se somete solo a la acción sísmica de cálculo o terremoto de proyecto, en una determinada dirección principal.
- *Desplazamiento sísmico de cálculo mayorado, d_{ba}* : desplazamiento total relativo entre las placas de extremo de un aislador elastomérico cuando el sistema estructural se somete solo a la acción sísmica de cálculo o terremoto de proyecto mayorado por un factor de fiabilidad γ_x , es decir, $d_{ba} = \gamma_x d_{bd}$.
- *Desplazamiento máximo, d_{Ed}* : desplazamiento total relativo entre las placas de extremo que experimenta un aislador elastomérico, en una dirección principal, incluyendo los efectos de todas las acciones (sísmicas y no sísmicas) y la aplicación del factor de fiabilidad γ_x a d_{bd} .
- *Desplazamiento de cálculo de la estructura, d_{cd}* : desplazamiento horizontal de la superestructura respecto del suelo en una dirección principal, medido en el centro de rigidez efectiva, cuando la estructura se somete solo al sismo de cálculo.
- *Elastómero*: material macromolecular, que vuelve aproximadamente a sus dimensiones y forma iniciales después de una deformación considerable por un esfuerzo débil y tras cesar dicho esfuerzo. En la parte 3 de UNE-EN 1337 se define el compuesto que será utilizado para la producción de una o varias partes del elastómero.
- *Fuerza sísmica de cálculo V_{bd}* : fuerza sísmica de cálculo en un aislador elastomérico correspondiente al desplazamiento sísmico de cálculo d_{bd} .
- *Rigidez efectiva (o eficaz) del aislador, $K_{eff,b}$* : relación entre el valor de la fuerza horizontal total transferida a través del dispositivo, V_{bd} , y el desplazamiento sísmico de cálculo d_{bd} (rigidez secante).
- *Rigidez efectiva (o eficaz) del sistema de aislamiento, K_{eff}* : suma de las rigideces combinadas de cada pila y sus aisladores para el desplazamiento sísmico de cálculo respecto del suelo d_{cd} (rigidez secante).

- *Amortiguamiento efectivo (o eficaz) del aislador, $\xi_{eff,b}$* : valor de la fracción de amortiguamiento efectivo de un aislador elastomérico, que corresponde a la energía disipada por el mismo en un ciclo de amplitud igual al desplazamiento sísmico de cálculo d_{bd} .
- *Amortiguamiento efectivo del sistema de aislamiento, ξ_{eff}* : valor de la fracción de amortiguamiento efectiva del sistema de aislamiento, correspondiente a la energía disipada por el sistema de aislamiento en un ciclo de amplitud igual al desplazamiento sísmico de cálculo de la estructura respecto del suelo d_{cd} .
- *Periodo efectivo, T_{eff}* : periodo de un sistema de un solo grado de libertad oscilando en la dirección considerada, teniendo una masa igual a la de la superestructura y una rigidez igual a la del sistema de aislamiento.
- *Ciclo de deformaciones*: curva fuerza-desplazamiento de los elementos estructurales con respuesta no lineal, sometidos a un ciclo de desplazamiento impuesto.
- *Energía disipada, E_D* : energía disipada en cada ciclo de deformación, que es igual al área encerrada por la curva fuerza-desplazamiento en un ciclo.
- *Ensayos de tipo (Type Test)*: ensayos que permiten determinar y establecer los valores representativos de las propiedades de los aisladores elastoméricos con el propósito de validar la combinación particular de materiales empleada o el procedimiento particular de fabricación empleado y de verificar que las propiedades del aislador elastomérico que se va a fabricar son acordes a las utilizadas en el cálculo del sistema de aislamiento.
- *Ensayos de control de producción en fábrica (Factory Production Control Tests o FPCT)*: ensayos que debe realizar el fabricante de manera regular, junto con un sistema de control de la calidad, para asegurar que todos los aisladores elastoméricos fabricados que se van a disponer en la infraestructura pueden asimilarse a los justificados con los ensayos de tipo.

2.3 Símbolos

Para los propósitos de esta guía, son aplicables los siguientes símbolos provenientes de UNE-EN 15129, UNE-EN 1337 y UNE-EN 1998. Se adopta el criterio de no repetir los símbolos comunes a las tres normas, priorizando su inclusión según el formato de símbolos de UNE-EN 15129:

2.3.1 Símbolos de UNE-EN 15129

2.3.1.1 Letras latinas en mayúsculas

- | | |
|-------|--|
| A | área planta total del apoyo elastomérico [m ²] |
| A_I | área en planta efectiva del aislador elastomérico (área en planta común al elastómero y a las placas de zunchado de acero), excluyendo el área de cualquier agujero si estos no son tapados posteriormente de forma efectiva [m ²] |

A_r	área en planta efectiva reducida del aislador elastomérico calculada únicamente con las acciones no sísmicas, y excluyendo siempre el área de posibles perforaciones, tanto si están rellenas como si no [m ²]. En la guía se utiliza $A_{r,E}$ y $A_{r,P}$ para referirse al A_r de los aisladores de estribos y pilas, respectivamente
D_I	diámetro efectivo del aislador elastomérico circular (denominado D' en esta guía) [m]
E_b	valor del módulo de compresibilidad volumétrica [kN/m ²]
E_c	valor del módulo de compresión o de elasticidad longitudinal de una capa de elastómero [kN/m ²]
$E_{c,i}$	valor del módulo de compresión E_c de cada capa de elastómero [kN/m ²]
$E_{I,c}$	valor del módulo de compresión [kN/m ²]
F_{UB}	fuerza sísmica horizontal de cálculo de un aislador elastomérico correspondiente al desplazamiento sísmico mayorado por el coeficiente de fiabilidad aumentada, γ_x . Se obtiene empleando el límite superior de sus propiedades mecánicas. Se utiliza para el dimensionamiento de los anclajes [kN]
F_{LB}	fuerza sísmica horizontal de cálculo de un aislador elastomérico correspondiente al desplazamiento sísmico mayorado por el coeficiente de fiabilidad aumentada, γ_x . Se obtiene empleando el límite inferior de sus propiedades mecánicas [kN]
G	valor nominal del módulo de elasticidad transversal convencional o módulo de cizalla convencional del apoyo elastomérico [kN/m ²]
K_b	rigidez horizontal del aislador elastomérico frente a acciones horizontales [kN/m]. En la guía se utiliza $K_{b,E}$ y $K_{b,P}$ para referirse a la K_b de los aisladores de estribos y pilas, respectivamente. También se utiliza $K_{b,i,x}$ y $K_{b,i,y}$ para referirse a K_b de un aislador en las dos direcciones principales.
K_v	rigidez vertical total del aislador elastomérico frente a acciones verticales [kN/m]
K_θ	rigidez a flexión del aislador elastomérico frente a giros de eje horizontal [kNm/rad]
K_{eff}	rigidez efectiva del sistema de aislamiento frente a acciones horizontales [kN/m].
$K_{eff,b}$	rigidez efectiva del aislador elastomérico frente a acciones horizontales [kN/m]. En la guía se utilizan $K_{eff,b,i,x}$ y $K_{eff,b,i,y}$ para referirse a $K_{eff,b}$ de un aislador en las dos direcciones principales.
K_2	rigidez post-elástica del aislador elastomérico frente a acciones horizontales [kN/m]
K_L	factor de tipo de carga
$N_{Ed,max}$	carga vertical máxima de cálculo en la combinación sísmica frente al terremoto de proyecto [kN]

$N_{Ed,min}$	carga vertical mínima de cálculo en la combinación sísmica frente al terremoto de proyecto (puede ser de tracción) [kN]
$N_{Sd,ELU}$	carga vertical máxima de cálculo en la combinación fundamental de acciones, según UNE-EN 1990, cuando el desplazamiento horizontal aplicado vale cero [kN]
$N_{Sd,ELS}$	carga vertical máxima en la combinación característica de acciones, según UNE-EN 1990 [kN]
P_{cr}	carga vertical crítica de pandeo por flexión lateral [kN]
S	factor de forma de las capas de material elastomérico
T_b	altura total del aislador elastomérico sin incluir las placas de anclaje, e incluyendo las placas de zunchado interiores vulcanizadas con el material elastómero y las placas de extremo adheridas en caliente al material elastómero [m]
T_{eff}	periodo efectivo del sistema de aislamiento [s]
T_q	espesor total de las capas de material elastómero que deforma a cortante; no se incluyen las placas de zunchado interiores vulcanizadas con el material elastómero ni las placas de extremo adheridas en caliente al material elastómero; en el caso de aisladores elastoméricos insertados en rebajes de las placas de anclaje, no se incluye el espesor de las capas de material elastómero cuya deformación a cortante esté impedida por el rebaje [m]
T_U	límite superior del valor de la temperatura de servicio, según UNE-EN 1991-1-5 [°C]
T_L	límite inferior del valor de la temperatura de servicio, según UNE-EN 1991-1-5 [°C]
V_{bd}	fuerza sísmica horizontal de cálculo correspondiente al desplazamiento d_{bd} [kN/m]. También se usa $V_{bd,UB}$ y $V_{bd,LB}$ cuando la fuerza se obtiene con propiedades UBDP y LBDP, respectivamente
V_{Ed}	fuerza horizontal correspondiente al desplazamiento d_{Ed} [kN/m]

2.3.1.2 Letras latinas en minúsculas

a	anchura total del aislador elastomérico (dimensión menor en el caso de aislador elastomérico rectangular) [m]
a'	anchura efectiva del aislador elastomérico (anchura de las placas de refuerzo) [m]
b	longitud total del aislador elastomérico (dimensión mayor en el caso de aislador elastomérico rectangular) [m]
b'	longitud efectiva del aislador elastomérico (longitud de las placas de refuerzo) [m]

a_l	anchura efectiva (anchura de las plazas de refuerzo) del lado de menor dimensión de un aislador elastomérico rectangular, es decir, $a_l = \min(a', b')$ [m]
d_{bd}	desplazamiento sísmico horizontal de cálculo de un aislador elastomérico, en una dirección principal, debido al sismo de cálculo o terremoto de proyecto [m]
d_{Ed}	desplazamiento horizontal total máximo de un aislador elastomérico, en una dirección principal, en cualquier tipo de estructura. En puentes, coincide con d_{max} y se obtiene como suma de $\gamma_x d_{bd}$ y de los desplazamientos debidos a las cargas permanentes, a las deformaciones de larga duración de la superestructura y al 50 % de las acciones térmicas [m]
d_{max}	desplazamiento horizontal total máximo de un aislador elastomérico, en una dirección principal, obtenido como suma de $\gamma_x d_{bd}$ y de los desplazamientos debidos a las cargas permanentes, a las deformaciones de larga duración de la superestructura y al 50 % de las acciones térmicas (igual a d_{Ed} en puentes) [m]
f	frecuencia de vibración [Hz]
f_y	límite elástico del acero [MPa]
t_r	espesor efectivo de una capa de material elastómero (igual a t_i en aisladores elastoméricos) [m]
t_i	espesor de una capa de material elastómero individual en un aislador elastomérico [m]
n	número de capas de material elastómero

2.3.1.3 Letras griegas

δ	parámetro que tiene en cuenta la deformación a cortante en la comprobación de estabilidad a pandeo
$\varepsilon_{c,EI}$	deformación tangencial de cálculo en la capa de material elastómero debido a las cargas de compresión en la combinación sísmica
$\varepsilon_{\alpha,d}$	deformación tangencial de cálculo en la capa de elastómero debido a la rotación angular
$\varepsilon_{q,E}$	deformación tangencial por cortante en un aislador elastomérico correspondiente al desplazamiento de cálculo, d_{bd}
$\varepsilon_{q,max}$	deformación tangencial por cortante en un aislador elastomérico correspondiente al desplazamiento máximo
$\varepsilon_{t,d}$	deformación tangencial de cálculo nominal de la capa de elastómero

λ	coeficiente para el cálculo de la carga crítica de pandeo por flexión lateral
λ_{fi}	factor de variabilidad de propiedades
γ_b	coeficiente parcial de seguridad del aislador elastomérico
γ_{IS}	coeficiente de mayoración por fiabilidad aumentada en puentes
γ_m	factor de seguridad parcial para la resistencia del material elastómero
γ_R	factor de seguridad parcial para la estabilidad de rodamiento lateral
γ_{Rd}	coeficiente de sobrerresistencia para el cálculo de uniones y anclajes
γ_x	coeficiente de mayoración por fiabilidad aumentada (igual a γ_{IS} en puentes)
$\xi_{eff,b}$	fracción de amortiguamiento efectivo del apoyo elastomérico frente a las acciones horizontales sísmicas relativas al desplazamiento de cálculo, d_{bd}
ψ_{fi}	coeficiente de combinación de variabilidad de propiedades

2.3.2 Símbolos de UNE-EN 1337-3

2.3.2.1 Letras latinas en mayúsculas

A'	área en planta efectiva del aislador elastomérico (área en planta común al elastómero y a las placas de acero zunchado). En un apoyo sin agujeros, $A_I = A'$ [m ²]
D	diámetro total de un aislador elastomérico circular [m]
D'	diámetro efectivo de un aislador elastomérico circular (diámetro de las placas de zunchado) (D_I en UNE-EN 15129) [m]
$F_{z,d}$	carga vertical de cálculo [kN]
G_g	módulo de elasticidad transversal convencional aparente o módulo de cizalla convencional aparente, mediante ensayo [kN/m ²]
G_{dyn}	módulo de elasticidad transversal convencional bajo acciones dinámicas [kN/m ²]
K_h	factor para las tensiones de tracción inducidas en las placas de zunchado
K_p	factor de corrección del esfuerzo para las placas de zunchado

2.3.2.2 Letras latinas en minúsculas

l_p	perímetro libre de fuerza del aislador elastomérico [m]
t_e	espesor efectivo de una capa de material elastómero en compresión (igual a t_r en UNE-EN 15129) [m]
t_s	espesor de la placa de zunchado interior del aislador elastomérico [m]
$v_{x,d}$	desplazamiento máximo horizontal relativo entre las placas de extremo del aislador elastomérico en la dirección de la dimensión a del mismo debido a los efectos de todas las cargas de cálculo [m]. También utilizada con connotaciones particulares para la comprobación de aisladores del apartado 9.4.3
$v_{y,d}$	desplazamiento máximo horizontal relativo entre las placas de extremo del aislador elastomérico en la dirección de la dimensión b del mismo debido a los efectos de todas las cargas de cálculo [m]. También utilizada con connotaciones particulares para la comprobación de aisladores del apartado 9.4.3
$v_{xy,d}$	desplazamiento máximo horizontal relativo entre las placas de extremo del aislador elastomérico obtenido por la suma vectorial de $v_{x,d}$ y $v_{y,d}$. Se utiliza en aisladores LDRB "sencillos" según el apartado 7.6.2(6) de UNE-EN 1998-2 [m]

2.3.2.3 Letras griegas

$\alpha_{a,d}$	rotación angular según un eje horizontal coincidente con la dirección en la que se mide la anchura a de un aislador elastomérico rectangular [rad]
$\alpha_{b,d}$	rotación angular según un eje horizontal coincidente con la dirección en la que se mide la anchura b de un aislador elastomérico rectangular [rad]
$\alpha_{ab,d}$	rotación angular según un eje horizontal en apoyos circulares según el borrador de la 2.ª generación de la norma EN 1337-3 [rad]
$\varepsilon_{q,d}$	deformación tangencial por cortante en un apoyo elastomérico correspondiente al desplazamiento de cálculo de las combinaciones no sísmicas, según UNE-EN 1337-3. También usada en UNE-EN 1998-2 para los LDRB "sencillos"

2.3.3 Símbolos de UNE-EN 1998

2.3.3.1 Letras latinas en mayúsculas

A_{Ed}	valor de las acciones sísmicas de cálculo. $A_{Ed,x}$, $A_{Ed,y}$ y $A_{Ed,z}$, representan la acción sísmica actuando en cada una de las direcciones principales (X , Y , Z)
B	dimensiones transversal o ancho del tablero [m]

E_D	energía disipada por ciclo [kJ o kNm]
E_S	energía disipada por ciclo [kJ o kNm]
E_{Ed}	efecto de las acciones sísmicas de cálculo. $E_{Ed,x}$, $E_{Ed,y}$ y $E_{Ed,z}$, representan los efectos en cada una de las direcciones principales (X, Y, Z)
L	dimensiones longitudinales del tablero entre juntas [m]
V_d	cortante de cálculo a nivel de interfaz del sistema de aislamiento [kN]
V_f	cortante de cálculo a nivel de interfaz del sistema de aislamiento obtenido mediante aplicación del método del modo fundamental [kN]
S_a	ordenada del espectro de respuesta elástica de aceleraciones [m/s^2]
S_d	ordenada del espectro de respuesta elástica de desplazamientos [m]

2.3.3.2 Letras latinas en minúsculas

a_g	aceleración horizontal de cálculo según el apartado 3.2.1 de UNE-EN 1998-1
a_{gR}	aceleración máxima de referencia del suelo en un terreno tipo A
a_{vg}	aceleración vertical de cálculo según el apartado 3.2.2.3 de UNE-EN 1998-1
d_a	media de los desplazamientos de todas las cabezas de las pilas en la dirección transversal bajo una distribución de fuerzas transversales similar a las sísmicas [m]
d_{cd}	desplazamiento sísmico de cálculo de un aislador respecto del suelo (desplazamiento en el centro de rigidez del sistema de aislamiento) [m]
d_{cf}	desplazamiento sísmico de cálculo de un aislador respecto del suelo (desplazamiento en el centro de rigidez del sistema de aislamiento) obtenido mediante aplicación del método del modo fundamental [m]
d_G	desplazamiento horizontal a largo plazo debido a las acciones permanentes y cuasi-permanentes, en la misma dirección principal que d_{bd} [m]. También se usa $d_{G,UB}$ y $d_{G,LB}$ para cuando el desplazamiento se obtiene con propiedades UBDP y LBDP, respectivamente
$d_{m,i}$	desplazamiento máximo de un aislador (igual a d_{max} y d_{Ed} en puentes) [m]
q	factor de comportamiento

2.3.3.3 Letras griegas

α	coeficiente de cortante dinámico por acción sísmica. Se usan en esta guía α_{max} y α_{min} como valores máximo y mínimo que puede adoptar α
γ_I	coeficiente de importancia
Δ_d	diferencia máxima entre los desplazamientos de todas las cabezas de las pilas bajo una distribución de fuerzas transversales similar a las sísmicas [m]
η	coeficiente corrector de amortiguamiento
η_{eff}	coeficiente corrector de amortiguamiento correspondiente a la fracción de amortiguamiento efectivo del sistema
λ_{fi}	factor de variabilidad de propiedades
$\lambda_{max,fi}$	factor de variabilidad de propiedades relativo a las propiedades UBDP
$\lambda_{min,fi}$	factor de variabilidad de propiedades relativo a las propiedades LBDP
$\lambda_{U,fi}$	coeficiente de modificación de límite superior de las propiedades
$\lambda_{L,fi}$	coeficiente de modificación de límite inferior de las propiedades
ξ_I	fracción de amortiguamiento inherente de la estructura
$\xi_{v,b}$	fracción de amortiguamiento asociado al periodo de vibración en régimen elástico

2.3.4 Símbolos particulares a efectos de esta guía

2.3.4.1 Letras latinas en mayúsculas

A'_{min}	área de apoyo necesaria para resistir la reacción vertical máxima con una tensión de 20 MPa
$A_{r,UB}$	área en planta efectiva reducida del aislador elastomérico, A_r , calculada con propiedades UBDP [m ²]
$A_{r,UB}$	área en planta efectiva reducida del aislador elastomérico, A_r , calculada con propiedades LBDP [m ²]
$E_{I,cUB}$	módulo de compresión, $E_{I,c}$, calculado con propiedades UBDP
$E_{I,cLB}$	módulo de compresión, $E_{I,c}$, calculado con propiedades LBDP
$G_{UB,sen}$	cuando los aisladores son "sencillos" según UNE-EN 1998-2 [MPa]

G_{LB}	módulo de elasticidad transversal dinámico, G , calculado con propiedades LBDP
G_{max}	carga permanente que produce la máxima reacción vertical en un aislador [kN]. También se usa como módulo de rigidez transversal dinámico supuesto un coeficiente de amplificación de la rigidez por acción sísmica, α , máximo [MPa]
F_z	reacción de eje vertical en un apoyo o aislador. También se usa, de manera general, $F_{z,max}$ y $F_{z,min}$ [kN]
$F_{z,d,ELU,max}$	reacción de eje vertical en un aislador en ELU de combinaciones no sísmicas. También se usa, de manera general, $F_{z,d,ELU,max}$ y $F_{z,d,ELU,min}$ [kN]
$F_{x,d}$	fuerza según la dirección principal horizontal, X , asociada al desplazamiento $v_{x,d}$ [kN]
$F_{y,d}$	fuerza según la dirección principal horizontal, Y , asociada al desplazamiento $v_{y,d}$ [kN]
$F_{z,d}$	fuerza según la dirección principal vertical, Z , asociada al desplazamiento $v_{z,d}$ [kN]
$F_{z,G}$	fuerza vertical sobre el aislador elastomérico debido a la carga permanente [kN]
$F_{z,P}$	fuerza vertical sobre el aislador elastomérico debido a los efectos hiperestáticos del pretensado [kN]
$F_{z,Sc}$	fuerza vertical sobre el aislador elastomérico debido a los efectos de la sobrecarga de tráfico [kN]
$F_{z,T}$	fuerza vertical sobre el aislador elastomérico debido a los efectos del gradiente térmico [kN]
H	a altura total del aislador elastomérico, incluyendo las capas de material elastómero, las placas de zunchado interiores, las placas de extremo y las placas de anclaje [m]
K_P	rigidez lateral de una pila [kN/m]
K_E	rigidez lateral de un estribo [kN/m]
K_{P+b}	rigidez lateral sumada en serie de una pila y su aislador [kN/m]
K_{E+2b}	rigidez lateral sumada en serie de un estribo y sus dos aisladores [kN/m]
$K_{b,UB}$	rigidez horizontal del aislador elastomérico frente a acciones horizontales obtenido con propiedades UBDP [kN/m]
$K_{b,LB}$	rigidez horizontal del aislador elastomérico frente a acciones horizontales obtenido con propiedades LBDP [kN/m]
M_t	momento torsor de eje de tablero [kNm]
V_{cd}	cortante basal sísmico del puente (sin mayorar por γ_x) en una dirección principal [kN]

$V_{bd,UB}$	fuerza horizontal sísmica de cálculo en un aislador calculada con el límite superior del valor de las propiedades mecánicas del aislador elastomérico (igual a F_{UB}) [kN]
$V_{bd,LB}$	fuerza sísmica de cálculo en un aislador calculada con el límite inferior del valor de las propiedades mecánicas del aislador elastomérico (igual a F_{LB}) [kN]
V_{CP}	fuerza horizontal en el aislador debido a las acciones permanentes [m]
V_G	fuerza horizontal en el aislador debido a acciones no sísmicas, correspondiente al desplazamiento d_G [kN]. También se usa $V_{bd,UB}$ y $V_{bd,LB}$ cuando la fuerza se obtiene con propiedades UBDP y LBDP, respectivamente
V_P	fuerza horizontal en el aislador debido al acortamiento elástico del pretensado
V_T	fuerza horizontal en el aislador debido a acciones térmicas [m]
V_∞	fuerza horizontal en el aislador debido a efectos diferidos [m]

2.3.4.2 Letras latinas en minúsculas

d_{CP}	desplazamiento horizontal debido a acciones permanentes [m]
$d_{cd,min}$	desplazamiento sísmico de cálculo mínimo (desplazamiento mínimo en el centro de rigidez del sistema de aislamiento) [m]
$d_{bd,UB}$	desplazamiento sísmico de cálculo obtenido empleando el límite superior del valor de las propiedades mecánicas del aislador elastomérico [m]
$d_{bd,LB}$	desplazamiento sísmico de cálculo obtenido empleando el límite inferior del valor de las propiedades mecánicas del aislador elastomérico [m]
$d_{bd,x}$	desplazamiento sísmico horizontal de cálculo de un aislador elastomérico, d_{bd} , en la dirección principal X [m]
$d_{bd,y}$	desplazamiento sísmico horizontal de cálculo de un aislador elastomérico, d_{bd} , en la dirección principal Y [m]
$d_{bd,Tot}$	desplazamiento sísmico horizontal de un aislador elastomérico en la dirección de desplazamiento máximo [m]
$d_{lim,rod}$	desplazamiento límite para que se produzca inestabilidad por rodamiento [m]
$d_{max,X}$	vector de desplazamientos máximos en las direcciones principales X e Y para el sismo actuando en la dirección principal X , de componentes $d_{max,X} = [d_{max,X,x}, d_{max,X,y}]$ [m]
$d_{max,Y}$	vector de desplazamientos máximos en las direcciones principales X e Y para el sismo actuando en la dirección principal Y , de componentes $d_{max,Y} = [d_{max,Y,x}, d_{max,Y,y}]$ [m]

$d_{max,x}$	desplazamiento horizontal total máximo de un aislador elastomérico, d_{max} , en la dirección principal X [m]
$d_{max,y}$	desplazamiento horizontal total máximo de un aislador elastomérico, d_{max} , en la dirección principal Y [m]
$d_{max,Tot}$	desplazamiento horizontal total máximo de un aislador elastomérico en la dirección de desplazamiento máximo [m]
d_P	desplazamiento horizontal por acortamiento elástico del pretensado
d_T	desplazamiento horizontal por acciones térmicas [m]
d_∞	desplazamiento horizontal debido a efectos diferidos [m]
$n_{b,E}$	número de aisladores elastoméricos por cada estribo [m]
$n_{b,P}$	número de aisladores elastoméricos por cada pila [m]
n_E	número de estribos [m]
n_P	número de pilas [m]
t_{se}	espesor de la placa de extremo del aislador elastomérico [m]
$t_{i,i}$	espesor de una capa interior de material elastómero [m]
t_{lat}	espesor del recubrimiento lateral con material elastómero del aislador elastomérico [m]
$v_{G,x}$	desplazamiento máximo horizontal relativo entre las placas de extremo del aislador elastomérico en la dirección de la dimensión a del mismo debido a los efectos de las acciones no sísmicas en combinación sísmica [m]
$v_{G,y}$	desplazamiento máximo horizontal relativo entre las placas de extremo del aislador elastomérico en la dirección de la dimensión b del mismo debido a los efectos de las acciones no sísmicas en combinación sísmica [m]
$v_{z,d}$	desplazamiento máximo relativo entre las placas de extremo del aislador en la dirección principal vertical, Z , debido a las acciones sísmicas y no sísmicas. Se toman como positivos los desplazamientos en sentido de la aceleración de la gravedad [m]

2.3.4.3 Letras griegas

α_{long}	rotación angular de eje horizontal transversal al tablero (giro en el plano longitudinal-vertical del tablero) [mrad]
α_{trans}	rotación angular de eje horizontal longitudinal del tablero (giro en el plano transversal-vertical al tablero) [mrad]

ε_q	deformación tangencial por cortante en un aislador elastomérico correspondiente al desplazamiento de cálculo $\gamma_x d_{bd}$. Utilizado en esta guía para el pre-dimensionamiento
$\varepsilon_{q,max,Tot}$	deformación tangencial por cortante debido a los desplazamiento máximos en la dirección de máximo desplazamiento, $d_{max,Tot}$
$\varepsilon_{t,u}$	deformación tangencial última de la capa de elastómero
ξ_{eff}	fracción de amortiguamiento efectivo del sistema de aislamiento
σ_m	tensión normal media en una capa de elastómero por efecto de las cargas verticales máxima de ELU de combinación no sísmica
ω_N	factor de combinación del gradiente térmico con la componente uniforme, según UNE-EN 1991-1-5
ω_M	factor de combinación de la componente uniforme del térmico con el gradiente, según UNE-EN 1991-1-5
ψ_2	factor de simultaneidad del valor cuasipermanente de una acción variable, según UNE-EN 1990

2.3.4.4 Símbolos representativos de acciones

C_m	acción de carga muerta. También se usa $C_{m_{min}}(t_0)$ y $C_{m_{max}}(t_0)$ para la acción de carga muerta a corto plazo en las hipótesis de carga muerta mínima y máxima, y $C_{m_{min}}(t_\infty)$ y $C_{m_{max}}(t_\infty)$ para la acción de carga muerta a largo plazo
F_{sc}	acción de frenado y arranque de los vehículos
G_k	acción de las cargas permanentes
P_p	acción de peso propio. También se usa $P_p(t_0)$ para la acción de peso propio a corto plazo, y $P_p(t_\infty)$ para la acción de peso propio a largo plazo
$P, P(t_0)$	acción de pretensado del tablero al instante inicial
$P(t_\infty)$	acción de pretensado del tablero a largo plazo
Q, Q_k	acciones variables
Q_2	efectos de las cargas cuasipermanentes de larga duración (presión del terreno, corrientes etc.)
$S_{C,TS}$	acción de la sobrecarga de uso de modelo LM1 correspondiente al tándem
$S_{C,UDL}$	acción de la sobrecarga de uso uniformemente (UDL) distribuida de modelo LM1

V_{long}	acción del viento actuando en dirección longitudinal
$V_{long(Sc)}$	acción del viento actuando en dirección longitudinal en concomitancia con la sobrecarga de tráfico, tal que aumenta la superficie de exposición
V_{trans}	acción del viento actuando en dirección transversal
$V_{trans(Sc)}$	acción del viento actuando en dirección transversal en concomitancia con la sobrecarga de tráfico, tal que aumenta la superficie de exposición
$V_{v,desc}$	acción del viento actuando en dirección vertical en sentido descendente
$V_{v,asc}$	acción del viento actuando en dirección vertical en sentido ascendente
$\Delta dif(t_{\infty})$	acortamiento diferido total
$\Delta P(t_{\infty})$	acortamiento por pérdidas de pretensado por efecto de la fluencia
$\Delta r(t_{\infty})$	acortamiento diferido por fenómenos de retracción
$\Delta T_{N,exp}$	dilatación uniforme debido a la acción térmica de calentamiento, ΔT^+
$\Delta T_{N,con}$	contracción uniforme debido a la acción térmica
$\Delta T_{M,heat}$	gradiente térmico, o variación de la componente uniforme, de giro positivo según la orientación del eje transversal al tablero, debido a la acción térmica
$\Delta T_{M,cool}$	gradiente térmico, o variación de la componente uniforme, de giro negativo según la orientación del eje transversal al tablero, debido a la acción térmica

2.3.5 Notaciones y términos equivalentes entre normativas

Se muestra a continuación la equivalencia entre notaciones de los parámetros más relevantes utilizados en las diferentes normativas, así como la finalmente adoptada en esta guía.

Tabla 1a Equivalencia de símbolos

Término	Guía	UNE-EN 15129	UNE-EN 1337	UNE-EN 1998-2
Desplazamiento horizontal a largo plazo debida a las acciones permanentes y cuasipermanente	d_G	—	—	$d_{G,i}$
Desplazamiento sísmico de cálculo de un aislador elastomérico	d_{bd}	d_{bd}	—	$d_{bi,d}$
Desplazamiento horizontal total máximo de un aislador elastomérico	d_{max}	d_{Ed}, d_{max}	—	$d_{m,i}$
Módulo de elasticidad transversal (o de cizalla) convencional aparente	G_g	—	G_g	G_g
Módulo de elasticidad transversal (o de cizalla) convencional nominal	G	G	G^a	G_b
Espesor efectivo de la capa de material elastómero	t_r	t_r	t_e	—
Carga vertical máxima de cálculo	$N_{Ed,max}, N_{sd,ELU}$	$N_{Ed,max}, N_{sd,ELU}$	$F_{z,d}$	—
Coefficiente de mayoración por fiabilidad aumentada	γ_x	γ_x	—	γ_{IS}
Factor de forma para la rigidez al giro en aisladores elastoméricos rectangulares	k_R	k_R	K_s	—

^a El módulo de elasticidad transversal convencional G en UNE-EN 1337-3 no coincide con la definición que se hace de G en UNE-EN 15129 ya que en el primer caso no incluye los efectos dinámicos (ver apartado 5.1 de esta guía). En UNE-EN 1337-3, al módulo de elasticidad transversal que tiene en cuenta ciertos efectos dinámicos se le denomina G_{dyn}

Las diferentes normativas también utilizan distintos nombres para un mismo término. Se muestra a continuación la equivalencia de los principales términos, priorizando el uso del término según los Eurocódigos, por ser una norma de mayor rango que las de producto, o aquellos que se consideran más precisos.

Tabla 1b Equivalencia de términos

Parámetro	Guía	UNE-EN 15129	UNE-EN 1337	UNE-EN 1998-2	Otros términos típicos
G	Módulo de elasticidad transversal	Coeficiente de cizallamiento	Módulo de cizalla	Módulo de elasticidad transversal	Módulo de deformación (o rigidez) transversal
ε	Deformación tangencial	Deformación por cizallamiento	Deformación de diseño	Deformación tangencial	Deformación por cortante
V	Acción cortante	Acción de cizallamiento	Acción de cizalla	Acción cortante	—
—	Placas de zunchado	Placas de refuerzo	Placas de refuerzo	Chapas de refuerzo	—
—	Aisladores LDRB que se considera sometido a acciones sísmicas pequeñas	Aisladores LDRB sometidos a acciones sísmicas pequeñas	—	— ⁽¹⁾	—

⁽¹⁾ Los aisladores LDRB que se consideran sometidos a acciones sísmicas pequeñas, según UNE-EN 15129, no son lo mismo que los aisladores elastoméricos "sencillos" de UNE-EN 1998-2 (ver apartado 4.1 de la *Guía para el cálculo de aisladores elastoméricos de bajo amortiguamiento en zona sísmica*).

2.4 Abreviaturas

En esta guía se emplean las siguientes abreviaturas:

- CR: caucho de policloropreno
- NR: caucho natural
- Pphm: partes por 100 millones en volumen
- PTFE: politetrafluoroetileno
- ELS: Estado Límite de Servicio
- ELU: Estado Límite Último
- DP: propiedades nominales o medias de cálculo (*Design Properties*)
- LBDP: límite inferior del valor de las propiedades empleadas en el cálculo (*Lower Bound Design Properties*)

- UBDP: límite superior del valor de las propiedades empleadas en el cálculo (*Upper Bound Design Properties*)
- HDRB: aislador elastomérico de alto amortiguamiento (*High Damping Rubber Bearing*)
- LDRB: aislador elastomérico de bajo amortiguamiento (*Low Damping Rubber Bearing*)
- LRB: aislador elastomérico con núcleo de plomo (*Lead Rubber Bearing*)
- PPRB: aislador elastomérico con núcleo polimérico (*Polymer-Plug Rubber Bearing*)
- TT: ensayos de tipo (*Type Tests*)
- FPCT: ensayos de control de producción en fábrica (*Factory Production Control Tests*)

3

CONSIDERACIONES GENERALES Y DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA

3.1 Consideraciones generales

Esta guía pretende facilitar el trabajo del proyectista a la hora de realizar las comprobaciones exigidas por las normas UNE-EN 1337-3, UNE-EN 15129 y UNE-EN 1998-2 en lo relativo a apoyos elastoméricos de bajo amortiguamiento (LDRB). Para ello, se ha elegido un ejemplo representativo de una gran mayoría de los puentes de carretera en zonas sísmicas de España: un puente de tres vanos ubicado en Murcia, que es una de las zonas de mayor sismicidad en España.

Las dimensiones, tanto en altura total de elastómero como en área en planta, de un apoyo elastomérico varían considerablemente en función de la ubicación de la estructura y, principalmente, de la necesidad de consideración de la acción sísmica o no. Por ello, partiendo de una misma estructura base, por un lado, en la *Guía para el cálculo de apoyos elastoméricos. Ejemplo de aplicación según la UNE-EN 1337-3* [19] se realizan las comprobaciones exigidas por la UNE-EN 1337-3 suponiendo que la estructura no se encuentra en zona sísmica; por otro lado, y teniendo en cuenta las acciones sísmicas, en esta guía se determinarán las nuevas dimensiones necesarias para los apoyos y se realizarán las comprobaciones exigidas por UNE-EN 15129, UNE-EN 1998-2 y UNE-EN 1337-3.

3.2 Descripción de la estructura

La estructura que servirá de ejemplo para la obtención de las reacciones en los apoyos a dimensionar corresponde a un paso superior tipo losa de hormigón postesado, sin esviaje y de directriz recta, con una distribución de luces de 20 + 37,5 + 20 metros. Las figuras 1, 2 y 3 representan la geometría general del puente.

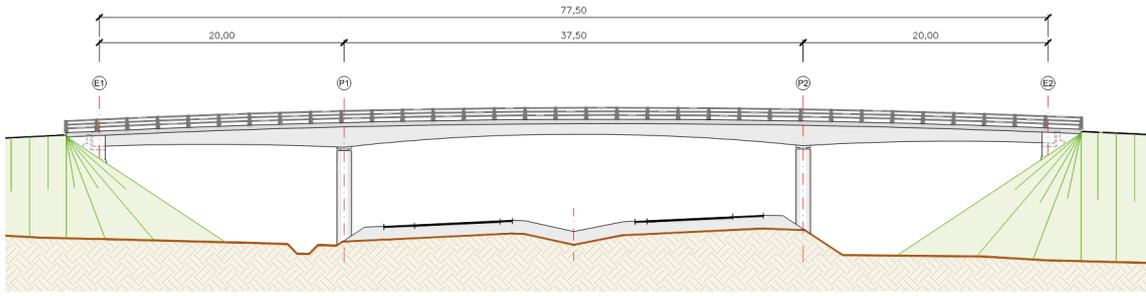


Figura 1 Alzado longitudinal del puente de referencia

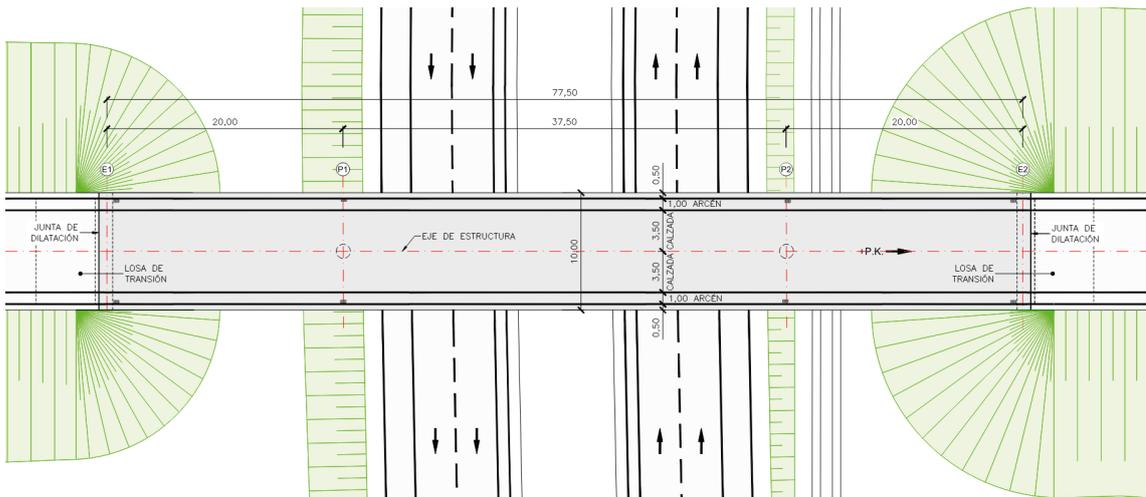


Figura 2 Planta del puente de referencia

El tablero está compuesto por hormigón C40/50 y una sección transversal de 10 metros de ancho total, que se reparte en dos carriles de 3,50 metros, arcenes de 1,00 metro y barreras de 0,50 metros. El canto del tablero es variable entre 0,90 metros en centro de vano y estribos y 1,70 metros sobre las pilas.

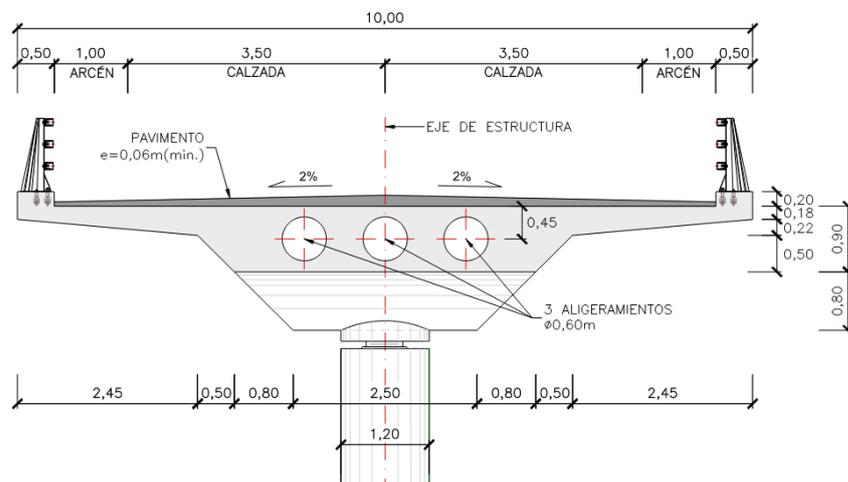


Figura 3 Sección transversal de tablero y pilas

Las pilas están compuestas de hormigón armado C30/37, fuste único de sección circular de 1,20 metros de diámetro y alturas en ambas pilas de 9,0 y 9,3 metros desde la cara superior hasta la cimentación.

El tablero descansa sobre aisladores elastoméricos de bajo amortiguamiento (LDRB), tanto en pilas como en estribos, con un módulo elasticidad transversal convencional aparente, G_g según UNE-EN 1337-3, de 0,9 MPa.

En las pilas, el apoyo es único; en los estribos, se disponen dos apoyos distanciados 6 metros transversalmente. La existencia de levantamiento frente a combinaciones no sísmicas obliga a la colocación de topes anti-levantamiento con dos apoyos invertidos distanciados 8,4 metros. Este apoyo anti-levantamiento será obviado para el cálculo como aislador elastomérico de bajo amortiguamiento.

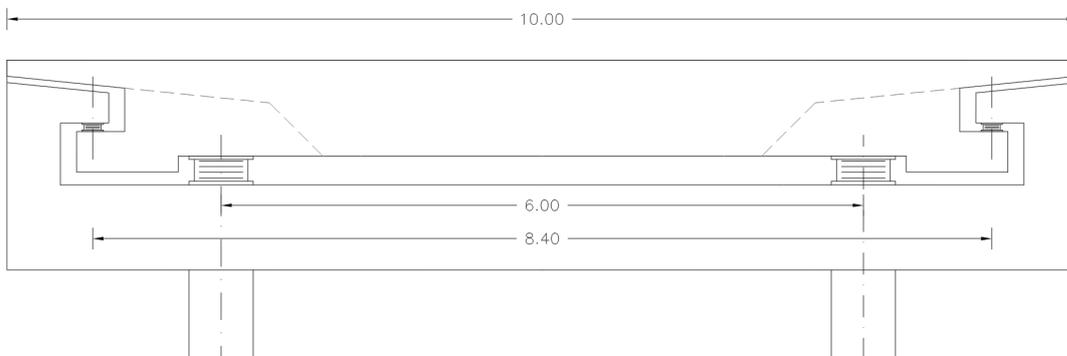


Figura 4 Sección transversal de tablero en eje de estribo

El tablero se ejecuta cimbrado al terreno en una sola fase.

4

ACCIONES, COMBINACIONES CONSIDERADAS PARA EL CÁLCULO Y PROPIEDADES DE CÁLCULO

4.1 Acción sísmica

La acción sísmica de cálculo se define mediante el espectro de respuesta de cálculo del Eurocódigo 8 (apartado 3.2.2.2 del Anejo Nacional de UNE-EN 1998-1), para un amortiguamiento inherente, ξ_I , del 5 %. Esta es también la fracción de amortiguamiento que se adopta para los aisladores LDRB en este ejemplo. Se han considerado los siguientes parámetros que lo definen, correspondientes a un suelo tipo de Murcia:

- Aceleración de referencia: $a_{gR} = 0,23g = 2,26 \text{ m/s}^2$
- Tipo de terreno: C
- Coeficiente de contribución: $K = 1$
- Coeficiente C: $C = 1,8$
- Clase de importancia II: $\gamma I = 1$
- Aceleración horizontal de cálculo: $a_g = 0,23g = 2,26 \text{ m/s}^2$
- Aceleración vertical de cálculo: $a_{vg} = 0,16g = 1,58 \text{ m/s}^2$
- Periodos de tramos del espectro horizontal: $T_B = 0,20 \text{ s}$; $T_C = 0,60 \text{ s}$; $T_D = 2,00 \text{ s}$
- Periodos de tramos del espectro horizontal: $T_{v,B} = 0,05 \text{ s}$; $T_{v,C} = 0,15 \text{ s}$; $T_{v,D} = 1,00 \text{ s}$

Se obtienen los siguientes espectros de respuesta de aceleraciones horizontal y vertical, que se muestran en la figura 5:

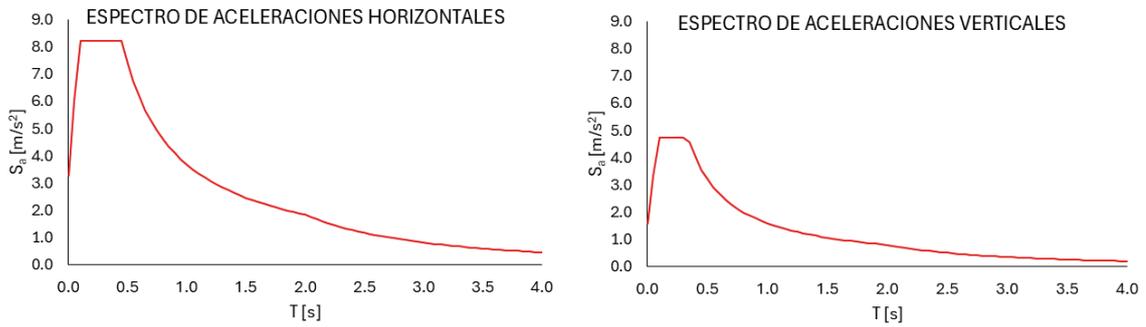


Figura 5 Espectro de respuesta de cálculo de aceleraciones horizontales (izquierda) y verticales (derecha) para $\xi_I = 0,05$

En puentes con sistemas de aislamiento, la componente vertical del sismo no podrá despreciarse cuando la aceleración vertical cumpla que $a_{vg} > 0,25g = 2.45 \text{ m/s}^2$, según se indica en el apartado 4.3.3.5.2 de UNE-EN 1998-1. Para un periodo de vibración habitual en puentes de 1,5 segundos, la aceleración vertical en este ejemplo sería de $0,11g = 1.08 \text{ m/s}^2$, por lo que podrá despreciarse.

Se muestra también, en la figura 6, el espectro horizontal de desplazamientos, por su posible interés para el cálculo de los desplazamientos laterales: $S_d = S_a T_{eff}^2 / (4\pi^2)$

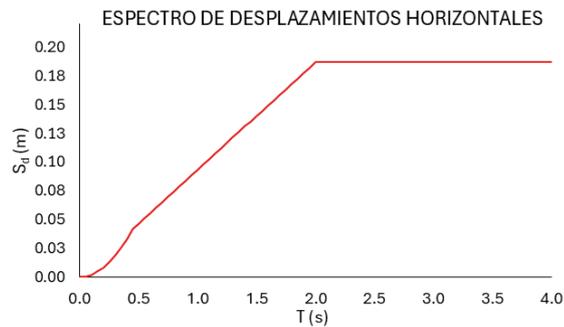


Figura 6 Espectro de respuesta elástico de cálculo de desplazamientos horizontales para $\xi_I = 0,05$

En el espectro de desplazamientos mostrado en la figura 6 se aprecia de forma evidente que, a partir del periodo T_D , el desplazamiento permanece constante independientemente del aumento del periodo T . Es decir, si bien al incrementar el nivel de aislamiento, aumentando el periodo propio de la estructura por encima de T_D , se seguiría reduciendo la respuesta en aceleraciones (y en fuerzas), el desplazamiento del centro de rigidez del sistema de aislamiento (tablero), d_{cd} , seguiría siendo el mismo. Por este motivo, el apartado 7.4.1(1)P de UNE-EN 1998-2 contempla que los anejos nacionales puedan incrementar, del lado de la seguridad, el valor de T_D para puentes aislados, permitiendo así que las comprobaciones de los aisladores se hagan frente a un desplazamiento mayor cuando los periodos de respuesta sean elevados. Sin embargo, el Anejo Nacional español no ha incluido matización relativa al periodo T_D en

puentes aislados, por lo que debe adoptarse el valor obtenido mediante la aplicación del apartado 3.2.2.2 del Anejo Nacional de UNE-EN 1998-1.

4.2 Acciones no sísmicas

Las acciones no sísmicas que deben considerarse para las verificaciones del puente se desarrollan ampliamente en la *Guía para el cálculo de apoyos elastoméricos. Ejemplo de aplicación* [19], y se resumen a continuación.

Para el establecimiento de las acciones no sísmicas se ha seguido lo indicado en los siguientes documentos:

- Eurocódigo 0: Bases de cálculo de estructuras (UNE-EN 1990)
- Eurocódigo 1: Acciones en estructuras:
 - Parte 1-1: Acciones generales. Pesos específicos, pesos propios y sobrecargas de uso en edificios (UNE-EN 1991-1-1)
 - Parte 1-4: Acciones generales. Acciones de viento (UNE-EN 1991-1-4)
 - Parte 1-5: Acciones generales. Acciones térmicas (UNE-EN 1991-1-5)
 - Parte 2: Cargas de tráfico en puentes (UNE-EN 1991-2)

4.2.1 Cargas permanentes

Las acciones permanentes (G_k , según la nomenclatura de UNE-EN 1990) incluyen las de aplicación directa (peso propio, carga muerta y pretensado) y las indirectas (retracción), que en esta guía reciben la nomenclatura de Pp , Cm , P y Δr , respectivamente. Estas acciones pueden producir efectos distintos a corto plazo (t_0) y largo plazo (t_∞).

Peso propio ($Pp(t_0)$):

El peso propio de la estructura se ha evaluado teniendo en cuenta un peso específico de 25 kN/m³ para el hormigón pretensado.

Carga muerta ($(Cm_{min}(t_0))$ y $Cm_{max}(t_0)$):

- Pavimento: se considera una densidad de $\gamma_{pav} = 23,0$ kN/m³ y un espesor nominal medio de 10,5 centímetros. Según lo indicado en el Anejo Nacional de UNE-EN 1991-1-1, se tiene en cuenta una desviación inferior del -20 % respecto del espesor teórico definido en el proyecto y una desviación superior del 50 %, dando lugar a unos valores máximo y mínimo posibles de la carga muerta.

- Pretiles: se adopta un peso del pretil de 0,75 kN/ml (por cada lateral) y del zuncho de borde de 2,5 kN/ml (0,2 x 0,5 por cada lateral).

Acciones reológicas ($\Delta dif(t_\infty)$, $Cm_{min}(t_\infty)$, $Cm_{max}(t_\infty)$):

Los efectos de los fenómenos reológicos se han tenido en cuenta según lo definido en UNE-EN 1992-1-1, para una humedad relativa del 65 % y un cemento clase N. En este ejemplo el efecto de acortamiento por retracción es $\Delta r(t_\infty)$ y fluencia (por pérdidas de pretensado, $(\Delta P(t_\infty))$, que se trata en el siguiente apartado) es $\Delta dif(t_\infty) = \Delta r(t_\infty) + \Delta P(t_\infty) = 0,310 + 0,243 = 0,553 \text{ mm/m}$.

Los fenómenos reológicos, en concreto la fluencia, pueden producir también variaciones ($\Delta(t_o - t_\infty)$) en las reacciones del puente de cargas permanentes, por lo que las acciones tienen que tener en cuenta los efectos a largo plazo debido a la fluencia ($Pp(t_\infty)$, $Cm_{min}(t_\infty)$ y $Cm_{max}(t_\infty)$).

4.2.2 Pretensado

Para la determinación de las pérdidas instantáneas del pretensado se ha considerado una penetración de cuñas de 5 milímetros, un coeficiente de rozamiento en curva (μ) de 0,21 y un coeficiente de rozamiento parásito por metro lineal, $k (K/\mu)$, de 0,007. Se han estimado unas pérdidas diferidas del 15 %. En este ejemplo el acortamiento elástico del hormigón por efecto del tesado de los cables de pretensado es de $d_p = 0,16 \text{ mm/m}$.

En este ejemplo el efecto de acortamiento por retracción ($\Delta r(t_\infty)$) y fluencia (por pérdidas de pretensado, $(\Delta P(t_\infty))$ es $\Delta dif(t_\infty) = \Delta r(t_\infty) + \Delta P(t_\infty) = 0,553 \text{ mm/m}$.

Los fenómenos reológicos, en concreto la fluencia, pueden producir también variaciones ($\Delta(t_o - t_\infty)$) en las reacciones hiperestáticas de pretensado debido a las pérdidas diferidas en la tensión de los cables ($\Delta P(t_\infty)$), por lo que tienen que incluirse los efectos a largo plazo en el pretensado debido a la fluencia $P(t_\infty)$. El efecto en desplazamientos de esta pérdida ya está incluido dentro de las acciones reológicas de acciones permanentes, G_k .

4.2.3 Sobrecargas de uso

Cargas verticales (Sc_{TS} y Sc_{UDL}):

Se ha aplicado el modelo de carga 1 (LM1), tal como se define en el apartado 4.3.2 de UNE-EN 1991-2, que consiste en dos sistemas parciales: cargas concentradas de doble eje (sistema tándem, TS); cargas uniformemente distribuidas (sistema UDL). La calzada, de 9 m de ancho, se ha dividido en tres carriles nominales:

Tabla 2 Modelo de carga 1: valores característicos (tabla 4.2 de UNE-EN 1991-2)

Localización	Sistema tándem TS	Sistema UDL
	Cargas por eje [kN]	Cargas distribuidas [kN/m ²]
Carril 1	300	9
Carril 2	200	2,5
Carril 3	100	2,5
Otros carriles	0	2,5
Área restante	0	2,5

Las diferentes configuraciones de colocación de los modelos de carga pueden dar lugar a los diferentes efectos de estas acciones en los ejes de apoyo:

- $max(F_z)$: máxima reacción vertical en el eje de apoyo (los valores positivos son compresiones). Generalmente se produce con todos los vanos sobrecargados al máximo.
- $min(F_z)$: mínima reacción vertical en el eje de apoyo (los valores positivos son compresiones). Generalmente se produce con vanos interiores sobrecargados al máximo, provocando el posible levantamiento de los vanos de extremo sin sobrecargas.
- $max(M_t)$: máximo torsor de eje de tablero. Generalmente se produce con el carril 1 plenamente cargado y colocado en un borde de la calzada, y los otros carriles sin cargar. En el puente de ejemplo, como las pilas son de fuste único y no puede transmitir torsión, esta condición es muy dominante y es la que transmite las reacciones máxima y mínima en los aisladores de estribo (el torsor se transmite al estribo mediante un par de fuerzas verticales en los aisladores).
- $min(M_t)$: mínimo torsor de eje de tablero (en valor absoluto). Generalmente se produce con el carril 1 centrado en la calzada.
- $max(\alpha_{long})$ y $min(\alpha_{long})$: giros en el plano longitudinal-vertical del puente, alrededor del eje transversal de apoyo, máximo y mínimo (con su signo según la orientación del eje transversal). Generalmente se produce con un vano sobrecargado al máximo
- $max(\alpha_{trans})$ y $min(\alpha_{trans})$: giros en el plano transversal-vertical de una sección del puente, alrededor del eje longitudinal del tablero, máximo y mínimo (con su signo según la orientación del eje longitudinal). Generalmente se produce en la situación de apoyo del tablero en pilas fuste único, como es el caso del puente de ejemplo, que no pueden recoger la torsión del tablero.

Fuerzas horizontales de frenado y arranque (F_{sc}):

El valor característico de esta acción es una fracción del valor de la sobrecarga característica vertical que se considere actuando en el carril virtual número 1, y se ha determinado de acuerdo con expresión 4.6 de UNE-EN 1991-2, obteniéndose un valor total de la fuerza de frenado y arranque de 570 kN.

4.2.4 Viento

Las acciones del viento se han determinado de acuerdo con UNE-EN 1991-1-4 para un periodo de retorno de 100 años, considerando un valor de 27 m/s (Zona B) de velocidad básica de viento según la figura AN.1 del Anejo Nacional UNE-EN 1991-1-4, y un terreno tipo II (zonas de vegetación baja y obstáculos aislados).

Para tener en cuenta la simultaneidad de las componentes transversal (V_{trans}), longitudinal (V_{long}) y vertical (descendente, $V_{v,desc}$, y ascendente, $V_{v,asc}$, aplicados en el tablero con una excentricidad de 2,5 m) del viento se ha actuado según lo indicado en el Anejo Nacional de UNE-EN 1991-1-4. El viento transversal sobre el tablero se ha considerado simultáneo con la componente vertical; el viento longitudinal sobre el tablero no se ha considerado simultáneo con ninguna de las restantes componentes, transversal o vertical. Tanto el viento longitudinal como el transversal pueden ir combinados con las sobrecargas de uso ($V_{trans(Sc)}$ y $V_{long(Sc)}$), generando una mayor superficie de exposición al viento.

4.2.5 Térmico

Los efectos térmicos se han determinado según UNE-EN 1991-1-5, para un tablero de hormigón tipo 3. La acción térmica se ha evaluado considerando la componente uniforme de temperatura y la componente de la diferencia de temperatura vertical (o gradiente térmico).

La componente uniforme de temperatura, que produce deformaciones horizontales impuestas en los aisladores, se obtiene partiendo de unas temperatura máxima y mínima del aire a la sombra en el lugar del emplazamiento del puente de 48 y -11 °C, según la figura AN.1 y la tabla AN.1 del Anejo Nacional del UNE-EN 1991-1-5, respectivamente. A continuación, se han realizado los ajustes del del Anejo A de UNE-EN 1991-1-5 para considerar un periodo de retorno de 100 años. Como el Anejo Nacional de UNE-EN 1991-1-5 indica que en el dimensionamiento de los apoyos se debe considerar una dilatación y una contracción adicional de ± 15 °C, se considera una máxima variación de contracción de la componente uniforme de la temperatura para la verificación de los aisladores, $\Delta T_{N,con}$, de 34,2 °C y una máxima variación de dilatación de la componente uniforme de la temperatura, $\Delta T_{N,exp}$, de 51,9 °C.

La diferencia vertical de temperatura (gradiente térmico), que produce giros adicionales en los aisladores, de acuerdo con el Anejo Nacional del UNE-EN 1991-1-5 y la tabla 6.1 de UNE-EN 1991-1-5, adopta valores de $\Delta T_{M,heat}$ y $\Delta T_{M,cool}$ iguales a 15 °C y 8 °C, respectivamente. $\Delta T_{M,heat}$ es el gradiente negativo (mayor temperatura superior que inferior) y $\Delta T_{M,cool}$ es el gradiente positivo (mayor temperatura inferior que superior).

Cuando ha sido necesario tener en cuenta la actuación simultánea de la variación de la componente uniforme, $\Delta T_{N,exp}$ o $\Delta T_{N,con}$, y la diferencia de temperatura vertical, $\Delta T_{M,heat}$ o $\Delta T_{M,cool}$, ambas componentes se han combinado entre sí según con lo indicado en el apartado 6.1.5 de UNE-EN 1991-1-5 y su Anejo Nacional (utilizando los factores de combinación $\omega_N = 0,35$ y $\omega_M = 0,75$).

4.2.6 Resumen de efectos de las acciones no sísmicas en situación sísmica

Los efectos de las acciones no sísmicas en situación sísmica pueden consistir en reacciones de aplicación directa sobre los apoyos, como es el caso de los efectos debido a las cargas permanentes, a las sobrecargas de tráfico o al viento; o en deformaciones impuestas, como es el caso de los fenómenos reológicos o el térmico. Los efectos de las acciones en situación sísmica que influyen en las comprobaciones según UNE-EN 15129 se han tomado de los resultados reflejados en la *Guía para el cálculo de apoyos elastoméricos. Ejemplo de aplicación* [19]. En las tablas 2 y 3 se resumen las reacciones y giros debidos a las acciones no sísmicas. No se incluyen los desplazamientos horizontales debido a estas acciones no sísmicas, ya que dependen de la rigidez horizontal de los aisladores elastoméricos, que puede no coincidir con la de los apoyos dimensionados en la *Guía para el cálculo de apoyos elastoméricos. Ejemplo de aplicación* [19]. En las tablas 3 y 4, se muestran sombreadas en gris las filas correspondientes a acciones no sísmicas en situación sísmica:

Tabla 3 Estribos. Fuerzas verticales y giros de eje horizontal debidos a acciones no sísmicas

Acciones no sísmicas		Fuerzas [kN]		Giros [mrad]	
		$F_{z,max}$	$F_{z,min}$	α_{long}	α_{transv}
G_k	Peso propio (t_0)- $Pp(t_0)$	292	292	0,15	0,00
	Δ Peso propio (t_∞)- $\Delta Pp(t_\infty)$	0	0	0,26	0,00
	Carga muerta max.- $Cm_{max}(t_0)$	67	67	0,15	0,00
	Δ Carga muerta max.- $\Delta Cm_{max}(t_\infty)$	0	0	0,26	0,00
	Carga muerta min. (t_0)- $Cm_{min}(t_0)$	41	41	0,09	0,00
	Δ Carga muerta min. (t_∞)- $\Delta Cm_{min}(t_\infty)$	0	0	0,16	0,00
	Acortamiento por retracción- $\Delta r(t_\infty)$	0	0	0,00	0,00
P	Pretensado (t_0)- $P(t_0)$	119	119	-0,93	0,00
	Δ Pretensado (t_∞)- $\Delta P(t_\infty)$	-20	-20	-1,39	0,00

(Continuación)

Acciones no sísmicas		Fuerzas [kN]		Giros [mrad]	
		$F_{z,max}$	$F_{z,min}$	α_{long}	α_{transv}
Q	Dilatación térmica uniforme- $\Delta T_{N,exp}$	0	0	0,00	0,00
	Contracción térmica uniforme- $\Delta T_{N,con}$	0	0	0,00	0,00
	Gradiente térmico (+)- $\Delta T_{M,cool}$	67	67	0,96	0,00
	Gradiente térmico (-)- $\Delta T_{M,heat}$	-36	-36	-0,51	0,00
	Acortamiento elástico- $P(t_0)$	0	0	0,00	0,00
	Sobrecarga UDL- $Sc_{UDL-max}(F_z)$	393	0	-0,95	0,00
	Sobrecarga UDL- $Sc_{UDL-min}(F_z)$	56	-306	1,11	0,00
	Sobrecarga UDL- $Sc_{UDL-max}(M_i)$	593	-488	0,11	0,00
	Sobrecarga UDL- $Sc_{UDL-min}(M_i)$	183	-144	0,04	0,00
	Sobrecarga UDL- $Sc_{UDL-max}(\alpha_{long})$	0	0	0,00	0,00
	Sobrecarga UDL- $Sc_{UDL-min}(\alpha_{long})$	0	0	0,00	0,00
	Sobrecarga UDL- $Sc_{UDL-max}(\alpha_{trans})$	56	-306	1,11	0,00
	Sobrecarga UDL- $Sc_{UDL-min}(\alpha_{trans})$	393	0	-0,95	0,00
	Sobrecarga TS- $Sc_{TS-max}(F_z)$	740	349	-0,68	0,00
	Sobrecarga TS- $Sc_{TS-min}(F_z)$	-48	-284	1,48	0,00
	Sobrecarga TS- $Sc_{TS-max}(M_i)$	565	-21	-0,34	0,00
	Sobrecarga TS- $Sc_{TS-min}(M_i)$	193	-3	-0,15	0,00
	Sobrecarga TS- $Sc_{TS-max}(\alpha_{long})$	0	0	0,00	0,00
	Sobrecarga TS- $Sc_{TS-min}(\alpha_{long})$	0	0	0,00	0,00
	Sobrecarga TS- $Sc_{TS-max}(\alpha_{trans})$	-48	-284	1,48	0,00
	Sobrecarga TS- $Sc_{TS-min}(\alpha_{trans})$	496	142	-1,94	0,00
	Frenado/Arranque- F_{sc}	0	0	0	0,00
	Viento transversal con Sc- $V_{trans}(Sc)$	61	-61	0,00	0,00
	Viento transversal sin Sc- V_{trans}	21	-21	0,00	0,00
	Viento longitudinal con Sc- $V_{long}(Sc)$	0	0	0,00	0,00
	Viento longitudinal sin Sc- V_{long}	0	0	0,00	0,00
	Viento vertical descendente- $V_{v,desc}$	191	-155	0,04	0,00
	Viento vertical ascendente- $V_{v,asc}$	-155	191	0,04	0,00

NOTAS

- Fuerza vertical: valores positivos de compresión; valores negativos de levantamiento. Las columnas de $F_{z,max}$ y $F_{z,min}$ representan la variación de carga vertical entre apoyos de un mismo estribo debido a la existencia de un momento torsor en la acción considerada.
- Fuerzas debidas a sobrecargas: $max(F_z)$ y $min(F_z)$ son las reacciones debidas a las configuraciones de sobrecarga que producen la mayor reacción global en el eje de apoyo.
- Giros: representados con su signo según la orientación de los ejes de giro (eje transversal en α_{long} , y eje longitudinal en α_{transv}). También de aplicación al gradiente térmico positivo y negativo ($\Delta T_{M,heat}$ y $\Delta T_{M,cool}$).

Tabla 4 Pilas. Fuerzas verticales y giros de eje horizontal debidos a acciones no sísmicas

Acciones no sísmicas	Fuerzas [kN]	Giros [mrad]	
	F_z	α_{long}	α_{transv}
Peso propio (t_0)- $Pp(t_0)$	5.205	-1,73	0,00
Δ Peso propio (t_∞)- $\Delta Pp(t_\infty)$	0	-3,11	0,00
Carga muerta max.- $Cm_{max}(t_0)$	1.382	-0,59	0,00
Δ Carga muerta max.- $\Delta Cm_{max}(t_\infty)$	0	-1,05	0,00
Carga muerta min. (t_0)- $Cm_{min}(t_0)$	844	-0,36	0,00
Δ Carga muerta min. (t_∞)- $\Delta Cm_{min}(t_\infty)$	0	-0,64	0,00
Acortamiento por retracción- $\Delta r(t_\infty)$	0	0,00	0,00
Dilatación térmica uniforme- $\Delta T_{N,exp}$	0	0,00	0,00
Contracción térmica uniforme- $\Delta T_{N,con}$	0	0,00	0,00
Gradiente térmico (+)- $\Delta T_{M,cool}$	-133	-0,59	0,00
Gradiente térmico (-)- $\Delta T_{M,heat}$	71	0,32	0,00
Pretensado (t_0)- $P(t_0)$	-238	2,98	0,00
Δ Pretensado (t_∞)- $\Delta P(t_\infty)$	41	4,47	0,00
Acortamiento elástico- $P(t_0)$	0	0,00	0,00
Sobrecarga UDL- $Sc_{UDL-max}(F_z)$	1.555	-0,77	-2,04
Sobrecarga UDL- $Sc_{UDL-min}(F_z)$	-72	0,14	-0,21
Sobrecarga UDL- $Sc_{UDL-max}(M_t)$	200	-0,12	-0,60
Sobrecarga UDL- $Sc_{UDL-min}(M_t)$	136	-0,02	-0,32
Sobrecarga UDL- $Sc_{UDL-max}(\alpha_{long})$	397	-0,17	0,98
Sobrecarga UDL- $Sc_{UDL-min}(\alpha_{long})$	1.086	-0,46	-3,23
Sobrecarga UDL- $Sc_{UDL-max}(\alpha_{trans})$	452	0,66	-0,88
Sobrecarga UDL- $Sc_{UDL-min}(\alpha_{trans})$	1.031	-1,28	-1,38
Sobrecarga TS- $Sc_{TS-max}(F_z)$	1.276	-1,13	-1,08
Sobrecarga TS- $Sc_{TS-min}(F_z)$	-163	0,33	-0,22
Sobrecarga TS- $Sc_{TS-max}(M_t)$	404	-0,48	0,02
Sobrecarga TS- $Sc_{TS-min}(M_t)$	361	-0,28	0,00
Sobrecarga TS- $Sc_{TS-max}(\alpha_{long})$	181	0,02	0,58
Sobrecarga TS- $Sc_{TS-min}(\alpha_{long})$	606	-0,06	-1,73
Sobrecarga TS- $Sc_{TS-max}(\alpha_{trans})$	793	1,15	-0,70
Sobrecarga TS- $Sc_{TS-min}(\alpha_{trans})$	1.111	-1,71	-0,90
Frenado/Arranque- F_{Sc}	0	0,00	0,00

(Continuación)

Acciones no sísmicas	Fuerzas [kN]	Giros [mrad]	
	F_z	α_{long}	α_{transv}
Viento transversal con Sc- $V_{trans}(Sc)$	0	0,00	0,30
Viento transversal sin Sc- V_{trans}	0	0,00	0,09
Viento longitudinal con Sc- $V_{long}(Sc)$	0	0,00	0,00
Viento longitudinal sin Sc- V_{long}	0	0,00	0,00
Viento vertical descendente- $V_{v,desc}$	378	-0,16	1,03
Viento vertical ascendente- $V_{v,asc}$	-378	0,16	-1,03

NOTAS

- Fuerza vertical: valores positivos de compresión; valores negativos de levantamiento. Las columnas de $F_{z,max}$ y $F_{z,min}$ representan la variación de carga vertical entre apoyos de un mismo estribo debido a la existencia de un momento torsor en la acción considerada.
- Fuerzas debidas a sobrecargas: $max(F_z)$ y $min(F_z)$ son las reacciones debidas a las configuraciones de sobrecarga que producen la mayor reacción global en el eje de apoyo.
- Giros: representados con su signo según la orientación de los ejes de giro (eje transversal en α_{long} , y eje longitudinal en α_{transv}). También de aplicación al gradiente térmico positivo y negativo ($\Delta T_{M,heat}$ y $\Delta T_{M,cool}$).

4.3 Combinaciones de acciones en situación sísmica, efectos y comprobaciones de Estado Límite Último

En este apartado se abordan los efectos de las combinaciones de cargas en situación sísmica (desplazamientos, esfuerzos, etc.) que se emplean en las comprobaciones de la estructura en Estado Límite Último (ELU). Las normas UNE-EN 15129 y UNE-EN 1998-2 establecen comprobaciones en las que los efectos a considerar son las reacciones verticales, los giros de eje horizontal y los desplazamientos horizontales. Se debe hacer también distinción entre las hipótesis de cargas que conducen a la situación más desfavorable con cada uno de estos efectos.

En el caso de los desplazamientos sísmicos horizontales entre las placas de extremo de los aisladores hay que tener en cuenta que se incrementan con un coeficiente de amplificación por fiabilidad, γ_x . También hay que tener en cuenta que, cuando se realizan las comprobaciones de desplazamientos horizontales que la norma define en una dirección principal (d_{bd} , d_{Ed} , d_{max} , etc.), las comprobaciones hay que realizarlas independientemente en cada dirección principal. En el caso de los LDRB "sencillos" según UNE-EN 1998-2, hay que realizar una comprobación adicional (apartado 7.6.2(6) de UNE-EN 1998-2) en la que los desplazamientos $v_{xy,d}$ no son en una dirección principal, sino que se obtienen sumando vectorialmente los desplazamientos en las dos direcciones principales, $v_{x,d}$ y $v_{y,d}$ (apartado 7.6.2(2) de UNE-EN 1998-2).

4.3.1 Combinación de acciones en situación sísmica y efectos de las mismas

El apartado 6.4.3.4 de UNE-EN 1990 establece la combinación general de acciones para situaciones sísmicas con la que se deben obtener los efectos (respuesta estructural) de la acción sísmica que intervienen en las comprobaciones en Estado Límite Último, y que viene dada por la siguiente expresión:

$$G_k \text{ "+" } P \text{ "+" } \sum \psi_{2,i} Q_{k,i} \text{ "+" } A_{E,d} \quad (1)$$

donde:

- G_k acciones permanentes y diferidas en valor característico
- P acción de pretensado que provoca reacciones verticales o giros debidos a los efectos hiperestáticos del pretensado (si los hubiera), en valor característico
- $\psi_{2,i} Q_i$ es el valor cuasipermanente de las acciones variables. Según la tabla AN.5 (A2.1) del Anejo Nacional de UNE-EN 1990, en puentes de carretera $\psi_2 = 0$ para todas las acciones variables excepto: sobrecarga uniforme ($\psi_2 = 0,2$), térmico ($\psi_2 = 0,5$) y cargas de construcción ($\psi_2 = 1,0$)
- A_{Ed} acciones sísmicas de cálculo, incluido el sismo vertical según el apartado 3.2.2.3 de UNE-EN 1998-1. En puentes con sistemas de aislamiento, la componente vertical del sismo no podrá despreciarse cuando la aceleración vertical cumpla que $a_{vg} > 0,25g$, según se indica en el apartado 4.3.3.5.2 de UNE-EN 1998-1

Es importante señalar que el término A_{Ed} incluye en las tres componentes de traslación del movimiento del suelo: dos horizontales en las direcciones principales X e Y , $A_{Ed,x}$ y $A_{Ed,y}$, y una vertical en Z , $A_{Ed,z}$ (apartado 3.1.2(1) de UNE-EN 1998-2). Cuando se emplean los métodos modales espectrales, ya sea el del modo fundamental o el multimodal, el puente debe ser analizado por separado para cada una de estas tres componentes, y los efectos (respuesta estructural) obtenidos independientemente para cada componente, $E_{Ed,x}$, $E_{Ed,y}$ y $E_{Ed,z}$, deben combinarse conforme al apartado 4.2.1.4 de UNE-EN 1998-1, que remite al apartado 4.3.3.5.2 de UNE-EN 1998-1. Una forma de hacerlo es combinar los efectos debidos al sismo actuando en una dirección principal con el 30 % de los efectos debidos al sismo actuando en las otras dos direcciones. Es importante señalar que lo que se combinan son los efectos $E_{Ed,x}$, $E_{Ed,y}$ y $E_{Ed,z}$ (no la acción sísmica) obtenidos independientemente para cada componente, y únicamente los debidos a la acción sísmica (no los debidos a las cargas no sísmicas en situación sísmica). Dichos efectos serán en general vectores (de fuerza, desplazamiento, deformaciones...).

En la expresión (1) hay acciones no sísmicas ($G_{k,i}$, P , $\psi_{2,i} Q_{k,i}$) y acciones sísmicas (A_{Ed}). Nótese que el símbolo "+" se ha puesto entre comillas para indicar que debe interpretarse como "combinado con". El apartado 5.5 de la norma UNE-EN 1998-2 proporciona una expresión similar a (1) para combinar las acciones sísmicas con otras acciones, en la que se añade un cuarto sumando, Q_2 , que representa los efectos de las cargas cuasipermanentes de larga duración

como la presión del terreno, corrientes etc., que en general no afectan a los aisladores. En el ejemplo desarrollado en esta guía, $Q_2 = 0$.

Entre los efectos de las combinaciones de acciones dadas por la expresión (1) que intervienen en las comprobaciones de la estructura, están las reacciones verticales máxima y mínima ($N_{Ed,max}$, $N_{Ed,min}$) sobre los aisladores, los giros de los mismos según ejes horizontales perpendiculares a cada dirección principal (α_{long} y α_{trans} , para las direcciones principales longitudinal y transversal, respectivamente) y los desplazamientos máximos horizontales totales entre las chapas de extremos del aislador en cada dirección principal, d_{max} . A estos efectos contribuyen tanto las acciones no sísmicas en situación sísmica como las acciones sísmicas.

Los desplazamientos (d_{bd} , d_{Ed} , d_{max} , etc.) que se utilizan en las comprobaciones de los aisladores son desplazamientos en una dirección principal, tal y como explícitamente los define UNE-EN 1998-2. Se trata de los desplazamientos máximos horizontales entre las chapas de extremos del aislador en una determinada dirección principal, d_{max} , que se obtienen sumando, según se indica en la expresión (2), el desplazamiento d_{bd} en la dirección principal considerada provocado por la acción sísmica $A_{E,d}$, mayorado por el coeficiente de amplificación por fiabilidad, γ_x , y los desplazamientos d_G en esa misma dirección debidos a parte de las acciones no sísmicas en situación sísmica que intervienen en la expresión (1). Conviene enfatizar en que los desplazamientos horizontales máximos, d_{max} , hay que calcularlos en cada dirección principal (véanse los apartados 7.6.2(2) UNE-EN 1998-2 y 3.1.2 de UNE-EN 15129), y que a ellos contribuirán en general las tres componentes de la acción sísmica, A_{Edx} , A_{Edy} y A_{Edz} . Dicho de otra forma: d_{max} no es el desplazamiento máximo en una determinada dirección principal cuando el sismo actúa únicamente en esa dirección principal, sino la suma del desplazamiento en esa dirección principal que provoca la componente del sismo en dicha dirección y el 30 % de los desplazamientos en esa misma dirección que provocan las otras dos componentes del terremoto (o siguiendo la regla SRSS del apartado 4.3.3.5 de UNE-EN 1998-1). También conviene señalar que d_G se calcula teniendo en cuenta únicamente los desplazamientos de las acciones no sísmicas en situación sísmica indicadas en la ecuación (2), donde no se incluyen las sobrecargas de tráfico.

$$d_{max} = \gamma_x d_{bd} + d_G = \gamma_x d_{bd} + d_{CP} + d_P + d_\infty + 0,5d_T \quad (2)$$

donde:

d_{max} es el desplazamiento horizontal máximo relativo entre las placas de extremo de cada aislador en una determinada dirección principal

d_{bd} valor de cálculo del desplazamiento sísmico horizontal de cada aislador en una determinada dirección principal, X o Y . En cada dirección, d_{bd} se tiene en cuenta el desplazamiento en la dirección de análisis debido a los efectos torsionales en planta (asimetrías de rigideces y masas o puente curvo) por el sismo en la dirección perpendicular, y los efectos de las distintas componentes del terremoto combinadas según las reglas del apartado 4.3.3.3.2 de UNE-EN 1998-1. Conviene enfatizar que d_{bd} es el desplazamiento en una determinada dirección principal, no la suma vectorial de los desplazamientos en direcciones perpendiculares

- γ_x factor de aumento por fiabilidad, que en puentes adopta un valor $\gamma_x = 1,50$, según el apartado 7.6.2 de UNE-EN 1998-2 y el Anejo Nacional, y que se aplica únicamente al desplazamiento d_{bd}
- d_G es el valor de cálculo del desplazamiento horizontal relativo entre las placas de extremo de cada aislador debido a las acciones no sísmicas en situación sísmica en la misma dirección principal de d_{bd} , que se obtiene como suma de:
- d_{CP} : desplazamiento debido a acciones permanentes
 - d_P : desplazamiento debido al acortamiento elástico del pretensado
 - d_∞ : deformación a largo plazo de la superestructura (retracción, fluencia y pérdidas diferidas de pretensado)
 - $0,5d_T$: 50 % de la deformación por acción térmica

Comentario: la letra empleada para representar las acciones permanentes, G_k en UNE-EN 1990, utilizada en la expresión (1) de esta guía, no tiene relación con el subíndice empleado para el desplazamiento inicial por acciones no sísmicas, d_G , utilizado en UNE-EN 1998-2, que incluye otras acciones además de las permanentes. Por coherencia con las normativas de procedencia, en esta guía se mantiene la nomenclatura original.

Los valores de los efectos de las acciones no sísmicas en situación sísmica, $G_{k,j}$, P y $\psi_{2,i}Q_{k,i}$, de la expresión (1) sobre los aisladores de estribos y pilas del puente de este ejemplo se han desglosado en el apartado 4.2 de esta guía, pero por conveniencia en las tablas 5 y 6 se resume su contribución a las reacciones verticales máximas y mínimas, $N_{Ed,max}$ y $N_{Ed,min}$.

Tabla 5 **Estribos. Reacciones verticales en aisladores debido a las acciones no sísmicas en situación sísmica**

Acción	Nombre del efecto y valor de $\psi_{2,i}$	Contribución a $N_{Ed,max}$ [kN] ^a	Contribución a $N_{Ed,min}$ [kN] ^b
Carga permanente	$F_{z,G}$	359	333
Pretensado	$F_{z,P}$	119	99
Sobrecarga	$0,2 F_{z,SC}$	118	-98
Térmico	$0,5 F_{z,T}^b$	34	-18

^a Fuerza vertical: valores positivos de compresión; valores negativos de levantamiento.

^b Fuerza vertical por gradiente térmico: adoptan un valor máximo y mínimo según su concomitancia con térmico uniforme de calentamiento y de enfriamiento, respectivamente.

Tabla 6 Pilas. Reacciones verticales en aisladores debido a las acciones no sísmicas en situación sísmica

Acción	Nombre del efecto y valor de $\psi_{2,i}$	Contribución a $N_{Ed,max}$ [kN] ^a	Contribución a $N_{Ed,min}$ [kN] ^b
Carga permanente	$F_{z,G}$	6.587	6.049
Pretensado	$F_{z,P}$	-197	-238
Sobrecarga	$0,2 F_{z,SC}$	311	-14
Térmico	$0,5 F_{z,T}^b$	36	-67

^a Fuerza vertical: valores positivos de compresión; valores negativos de levantamiento.

^b Fuerza vertical por gradiente térmico: valor máximo y mínimo concomitantes con térmico uniforme de calentamiento y de enfriamiento, respectivamente.

4.3.2 Selección de hipótesis más desfavorables para el cálculo de los aisladores en estribos

La particularización de la expresión general de combinación de acciones (1) y de desplazamientos (2) da lugar a un elevado número de hipótesis a considerar para determinar los efectos de las acciones en situación sísmica, según se tomen valores máximos o mínimos de los efectos de cada acción, o de cómo se combinen las componentes del movimiento del suelo. De todas ellas, se muestran a continuación las hipótesis seleccionadas para las comprobaciones de aisladores de los estribos del puente objeto de este ejemplo, por considerar que son las más condicionantes. Estas hipótesis se han agrupado en cuatro paquetes según las características que tienen en común. Es importante señalar que en todas las hipótesis los desplazamientos horizontales relativos entre las chapas de extremo de los aisladores deben mayorarse por el factor de amplificación por fiabilidad $\gamma_x = 1,5$, y que los cortantes horizontales correspondientes se obtendrán de estos desplazamientos mayorados.

I. Hipótesis que da lugar a la máxima reacción vertical con el máximo desplazamiento horizontal concomitante:

Esta hipótesis permite comprobar la situación sísmica que proporciona la máxima reacción vertical, que da lugar a la mayor deformación tangencial por compresiones en el aislador, $\varepsilon_{c,El}$, y compromete la estabilidad a pandeo, que a veces es la comprobación que gobierna el dimensionado. En el puente de ejemplo, esta circunstancia se puede dar en edades tempranas (t_0), con la máxima carga permanente, componente sísmica transversal ($A_{Ed,y}$) tomada como dirección principal de la acción sísmica, componente sísmica vertical ($A_{Ed,z}$) en sentido descendente, y gradiente térmico positivo. La figura 7 muestra las fuerzas y deformaciones que intervienen en esta hipótesis.

- t_0 : indica que son acciones a corto plazo, para maximizar la reacción hiperestática de pretensado en estribos.

- $G_{max(t0)}$: carga permanente máxima (máximo espesor de pavimento), para maximizar la reacción vertical.
- $P_{(t0)}$: carga de pretensado a corto plazo, con máxima reacción hiperestática en estribos y acortamiento elástico sin pérdidas diferidas de cara al desplazamiento.
- $\psi_2 \cdot Sc_{UDL}$: valor cuasipermanente de las sobrecargas de tráfico UDL. Solo usado para las reacciones y giros, según la expresión (1). La expresión (2) de desplazamientos no incluye la sobrecarga de tráfico. En los estribos, la sobrecarga de tráfico produce máxima compresión cuando sólo está cargado medio tablero.
- $\psi_2 \cdot \Delta T_{M,cool}$: valor cuasipermanente del gradiente térmico positivo (cara superior del tablero a menor temperatura que la inferior), que produce reacciones de compresión en los estribos. Podrá haber un térmico uniforme concomitante con el gradiente, pero este producirá desplazamientos en la dirección longitudinal, que no es la dirección principal de comprobación en esta hipótesis.
- A_{Edx} , A_{Edy} y A_{Edz} : componentes de la acción sísmica. Se toma la componente A_{Edy} del sismo como dominante y la dirección transversal, Y , como dirección principal de comprobación, para que produzca la máxima reacción de compresión en un apoyo de estribo por el empotramiento a torsión causado por el doble apoyo en estribos (las fuerzas de inercia transversales se transmiten a los apoyos generando como reacciones dos fuerzas transversales V y un par de fuerzas verticales N). Cabe mencionar también que la componente vertical, A_{Edz} , se toma descendente, para maximizar la compresión sobre el apoyo.

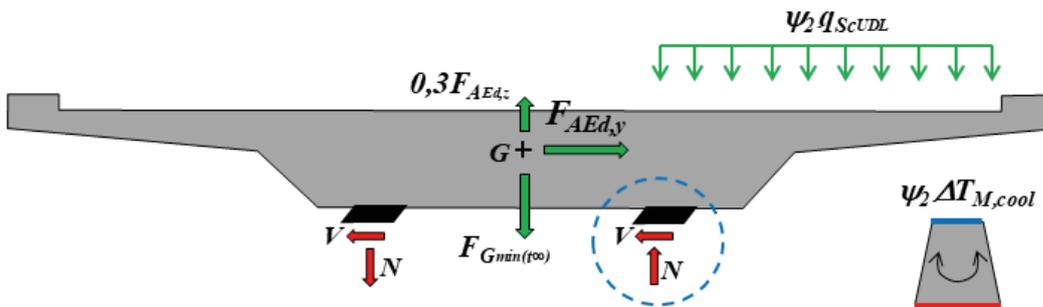


Figura 7 Esquema de fuerzas y deformaciones que producen la máxima compresión y el máximo desplazamiento horizontal concomitante en un aislador de estribo

Para las reacciones verticales y giros, las hipótesis consideradas tienen en cuenta las acciones de la expresión (3), que está basada en la combinación de cálculo de la expresión (1), y que es la que proporciona la máxima reacción vertical.

$$G_{max(t0)} + P_{(t0)} + 0,2Sc_{UDL} + 0,5\Delta T_{M,heat} + 0,3A_{Ed,x} + A_{Ed,y} + 0,3A_{Ed,z} \quad (3)$$

Las acciones consideradas en el cálculo de los desplazamientos horizontales son compatibles con (3), a la vez que se mantiene el criterio de la expresión (2) de no incluir las sobrecargas. Al tratarse de un puente recto y simétrico, no se producen

torsiones de eje vertical debido a las componentes horizontales del sismo y por lo tanto la componente X del sismo no va a contribuir a los desplazamientos en la dirección horizontal Y . La componente Z del sismo tampoco contribuye a los desplazamientos en la dirección horizontal Y . Las deformaciones horizontales en la dirección Y debidas a acciones permanentes, al pretensado y a efectos diferidos se consideran despreciables. Por lo tanto, las acciones consideradas en el cálculo de los desplazamientos horizontales en la dirección principal Y vienen dadas por la expresión (4), y el desplazamiento máximo de cálculo en esa dirección Y se obtiene con la expresión (5).

$$A_{Ed,y} \quad (4)$$

$$d_{max} = d_{max,y} = \gamma_x d_{bd,y} \quad (5)$$

II. Hipótesis que da lugar a la mínima reacción vertical con el máximo desplazamiento horizontal concomitante:

Esta hipótesis permite comprobar que no haya situaciones de tracción en el aislador y, además, puede ser la situación más condicionante frente a la estabilidad a rodamiento. En el puente de ejemplo, esta circunstancia se puede dar a largo plazo (t_∞), con la mínima carga permanente, componente sísmica transversal ($A_{Ed,y}$) tomada como dirección principal de la acción sísmica, componente sísmica vertical ($A_{Ed,z}$) en sentido ascendente, y gradiente térmico negativo. La figura 8 muestra un resumen de las fuerzas y deformaciones que dan lugar a esta hipótesis.

- t_∞ : indica que son acciones a largo plazo, para minimizar la reacción hiperestática de pretensado en estribos.
- $G_{min(t_\infty)}$: carga permanente mínima (mínimo espesor de pavimento), para minimizar la reacción vertical.
- $P_{(t_\infty)}$: carga de pretensado a largo plazo, con mínima reacción hiperestática en estribos y acortamiento elástico con pérdidas diferidas de cara al desplazamiento.
- $\psi_2 \cdot Sc_{UDL}$: valor cuasipermanente de la sobrecargas de tráfico UDL. Solo usado para las reacciones y giros, según la expresión (1). La expresión (2) de desplazamientos no incluye la sobrecarga de tráfico. En los estribos, la sobrecarga de tráfico produce mínima compresión (o tracción) cuando sólo está cargado medio tablero.
- $\psi_2 \cdot \Delta T_{M,heat}$: valor cuasipermanente del gradiente térmico negativo (cara superior del tablero a mayor temperatura que la inferior). Podrá haber un térmico uniforme concomitante con el gradiente, pero este producirá desplazamientos en la dirección longitudinal, que no es la dirección principal de comprobación en esta hipótesis.
- A_{Edx} , A_{Edy} y A_{Edz} : componentes de la acción sísmica. Se toma la componente A_{Edy} del sismo como dominante y la dirección transversal, Y , principal de

comprobación, para que produzca la máxima reacción de tracción en un apoyo de estribo por el empotramiento a torsión causado por la configuración de doble apoyo en estribos. Cabe mencionar también que la componente vertical, $A_{Ed,z}$, se toma ascendente, para detectar si surgen tracciones en el apoyo.

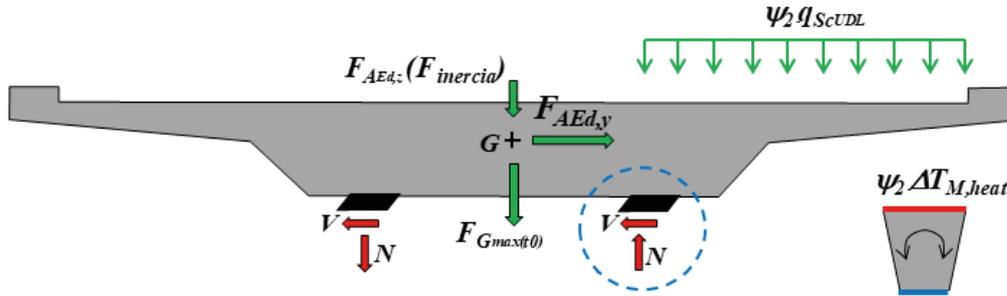


Figura 8 Esquema de fuerzas y deformaciones que producen la mínima compresión (o máxima tracción) y el máximo desplazamiento horizontal concomitante en un aislador de estribo

Para las reacciones verticales y giros, las hipótesis consideradas tienen en cuenta las acciones de la expresión (6), basada en la combinación de cálculo de la expresión (1), que es la que proporciona la mínima reacción vertical.

$$G_{min(t\infty)} + P_{(t\infty)} + 0,5\Delta T_{M,cool} + 0,3A_{Ed,x} + A_{Ed,y} + 0,3A_{Ed,z} \quad (6)$$

Las acciones consideradas en el cálculo de los desplazamientos horizontales son compatibles con (6), a la vez que se mantiene el criterio de la expresión (2) de no incluir las sobrecargas. Se desprecian las acciones térmicas en la dirección Y . Al tratarse de un puente recto y simétrico, no se producen torsiones de eje vertical debido a las componentes horizontales del sismo y por lo tanto la componente X del sismo no van a contribuir a los desplazamientos en la dirección horizontal Y . La componente Z del sismo tampoco contribuye a los desplazamientos en la dirección horizontal Y . Las deformaciones horizontales en la dirección Y debidas a acciones permanentes, al pretensado y a efectos diferidos se consideran despreciables. Por lo tanto, las acciones consideradas en el cálculo de los desplazamientos horizontales en la dirección principal Y que se emplea para las comprobaciones vienen dadas por la expresión (7), y el desplazamiento máximo de cálculo en esa dirección Y se obtiene con la expresión (8).

$$A_{Ed,y} \quad (7)$$

$$d_{max} = d_{max,y} = \gamma_x d_{bd,y} \quad (8)$$

III. Hipótesis que da lugar al máximo desplazamiento horizontal con la máxima compresión concomitante:

Esta hipótesis permite comprobar los aisladores frente a la máxima deformación tangencial que pueden sufrir en situación sísmica, debido al máximo cortante sísmico horizontal y a la máxima compresión compatible. En el puente de ejemplo, esta circunstancia se puede dar a largo plazo (t_{∞}), con la máxima carga permanente, componente sísmica longitudinal ($A_{Ed,x}$) tomada como dirección principal de la acción sísmica, componente sísmica vertical ($A_{Ed,z}$) en sentido descendente, térmico uniforme de contracción y gradiente térmico positivo concomitante. La figura 9 muestra un resumen de las fuerzas y deformaciones de esta hipótesis

- t_{∞} : indica que son acciones a largo plazo, para considerar los movimientos de acortamiento por retracción.
- $G_{max(t_{\infty})}$: carga permanente máxima (máximo espesor de pavimento), para maximizar la reacción vertical.
- $P_{(t_{\infty})}$: carga de pretensado a largo plazo, que incluye el acortamiento elástico menos las pérdidas diferidas.
- $\psi_2 \cdot S_{cUDL}$: valor cuasipermanente de la sobrecarga de tráfico UDL. Solo usado para las reacciones y giros, según la expresión (1). La expresión (2) que se emplea para el cálculo de desplazamientos no incluye la sobrecarga de tráfico. En los estribos, la sobrecarga de tráfico produce máxima compresión cuando sólo está cargado el vano de extremo.
- $\psi_2 \cdot \Delta T_{N,con} + \omega_M \psi_2 \cdot \Delta T_{M,cool}$: valor cuasipermanente del térmico de contracción, para producir el máximo desplazamiento longitudinal. Se ha verificado que el efecto del acortamiento provocado por el 50 % del térmico de contracción, sumado a los acortamientos por pretensado y de retracción, da lugar al mayor desplazamiento no sísmico posible, según la expresión (2). Se considera, además, el valor cuasipermanente del gradiente térmico positivo (cara superior del tablero a menor temperatura que la inferior) concomitante con el térmico uniforme con factor de combinación $\omega_M = 0,75$.
- $A_{Ed,x}$, $A_{Ed,y}$ y $A_{Ed,z}$: componentes de la acción sísmica. Se toma la componente $A_{Ed,x}$ del sismo como dominante y la dirección longitudinal, X , dirección principal de comprobación, para que produzca el máximo desplazamiento longitudinal. Cabe mencionar también que la componente vertical, $A_{Ed,z}$, se toma descendente, para maximizar la compresión sobre el apoyo.

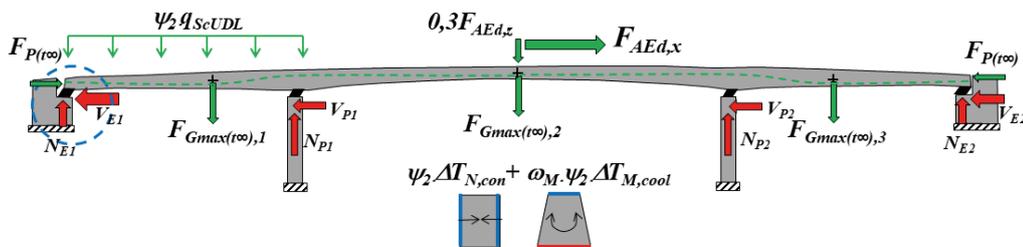


Figura 9 Esquema de fuerzas y deformaciones que producen el máximo desplazamiento y la máxima compresión concomitante en un aislador de estribo

Para las reacciones verticales y giros, la hipótesis considerada tiene en cuenta las acciones de la expresión (9), basada en la combinación de cálculo de la expresión (1), que es la que proporciona la máxima reacción vertical.

$$G_{max(t\infty)} + P_{(t\infty)} + 0,2SC_{UDL} + 0,5\omega_M\Delta T_{M,heat} + A_{Ed,x} + 0,3A_{Ed,y} + 0,3A_{Ed,z} \quad (9)$$

Las acciones consideradas para el cálculo de los desplazamientos horizontales son compatibles con (9), y a la vez mantiene el criterio de la expresión (2) de no incluir la sobrecarga. Al tratarse de un puente recto y simétrico, no se producen torsiones de eje vertical debido a las componentes horizontales del sismo y por lo tanto la componente Y del sismo no va a contribuir a los desplazamientos en la dirección horizontal X . La componente Z del sismo tampoco contribuye a los desplazamientos en la dirección horizontal X . Por lo tanto, las acciones consideradas en el cálculo de los desplazamientos horizontales en la dirección principal X que se emplea para las comprobaciones que vienen dadas por la expresión (10), y el desplazamiento máximo de cálculo en esa dirección X se obtiene con la expresión (11).

$$G_{max(t\infty)} + P_{(t\infty)} + 0,5\Delta T_{N,con} + A_{Ed,x} \quad (10)$$

$$d_{max} = d_{max,x} = \gamma_x d_{bd,x} + d_{G,x} \quad (11)$$

IV. Hipótesis que da lugar al máximo desplazamiento horizontal con la mínima compresión concomitante:

Esta hipótesis permite comprobar los aisladores frente al máximo cortante sísmico horizontal y la mínima compresión compatible, lo cual da lugar a la condición pésima de estabilidad frente a rodamiento. En el puente de este ejemplo, esta circunstancia se puede dar a largo plazo ($t\infty$), con la mínima carga permanente, componente sísmica longitudinal ($A_{Ed,x}$) tomada como dirección principal de la acción sísmica, componente sísmica vertical ($A_{Ed,z}$) en sentido ascendente, térmico uniforme de contracción y gradiente térmico negativo concomitante. La figura 10 muestra un resumen de las fuerzas y deformaciones de esta hipótesis.

- $t\infty$: indica que son acciones a largo plazo, para considerar los movimientos de acortamiento por retracción.
- $G_{min(t\infty)}$: carga permanente mínima (mínimo espesor de pavimento), para minimizar la reacción vertical.
- $P_{(t\infty)}$: carga de pretensado a largo plazo, que incluye el acortamiento elástico menos las pérdidas diferidas.
- $\psi_2 \cdot SC_{UDL}$: valor cuasipermanente de la sobrecarga de tráfico UDL. Solo usado para las reacciones y giros, según la expresión (1). La expresión (2) que se emplea para el cálculo de desplazamientos no incluye la sobrecarga de tráfico. En los

estribos, la sobrecarga de tráfico produce máxima compresión cuando sólo está cargado el vano de extremo.

- $\psi_2 \cdot \Delta T_{N,con} + \omega_M \psi_2 \cdot \Delta T_{M,heat}$: valor cuasipermanente del térmico de contracción, para producir el máximo desplazamiento longitudinal. Se ha verificado que el efecto del acortamiento provocado por el 50 % del térmico de contracción, sumado a los acortamientos por pretensado y de retracción, da lugar al mayor desplazamiento no sísmico posible, según la expresión (2). Se considera, además, el valor cuasipermanente del gradiente térmico negativo (cara superior del tablero a mayor temperatura que la inferior) concomitante con el térmico uniforme con factor de combinación $\omega_M = 0,75$.
- A_{Edx} , A_{Edy} y A_{Edz} : componentes de la acción sísmica. Se toma la componente A_{Edx} del sismo como dominante y la dirección longitudinal, X , como la dirección principal de comprobación, para que produzca el máximo desplazamiento longitudinal. Cabe mencionar también que la componente vertical, A_{Edz} , se toma descendente, para maximizar la compresión sobre el apoyo.

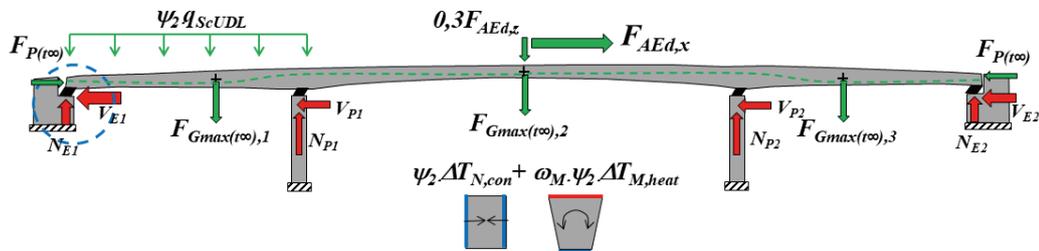


Figura 10 Esquema de fuerzas y deformaciones que producen el máximo desplazamiento y la máxima compresión concomitante en un aislador de estribo

Para las reacciones verticales y giros, la hipótesis considerada tiene en cuenta las acciones de la expresión (12), basada en la combinación de cálculo de la expresión (1), que es la que proporciona la mínima reacción vertical.

$$G_{min(too)} + P_{(too)} + 0,5\omega_M \Delta T_{M,cool} + A_{Ed,x} + 0,3A_{Ed,y} + 0,3A_{Ed,z} \quad (12)$$

Las acciones consideradas para el cálculo de los desplazamientos horizontales son compatibles con (12), y a la vez mantiene el criterio de la expresión (2) de no incluir la sobrecarga. Al tratarse de un puente recto y simétrico, no se producen torsiones de eje vertical debido a las componentes horizontales del sismo y por lo tanto la componente Y del sismo no va a contribuir a los desplazamientos en la dirección horizontal X . La componente Z del sismo tampoco contribuye a los desplazamientos en la dirección horizontal X . Por lo tanto, las acciones consideradas en el cálculo de los desplazamientos horizontales en la dirección principal X que se emplea para las comprobaciones vienen dadas por la expresión (13), y el desplazamiento máximo de cálculo en esa dirección X se obtiene con la expresión (14).

$$G_{\min(t_{\infty})} + P_{(t_{\infty})} + 0,5\Delta T_{N,con} + A_{Ed,x} \quad (13)$$

$$d_{max} = d_{max,x} = \gamma_x d_{bd,x} + d_{G,x} \quad (14)$$

4.3.3 Selección de hipótesis de cálculo más desfavorables para el cálculo de los aisladores en pilas

De todas las posibles hipótesis de carga que surgen de la expresión (1) de combinación de acciones, se han determinado las que dan lugar a las situaciones más condicionantes de cara a la comprobación de los aisladores. Es importante señalar que en todas las hipótesis los desplazamientos horizontales relativos entre las chapas de extremo de los aisladores deben mayorarse por el factor de amplificación por fiabilidad $\gamma_x = 1,5$, y que los cortantes horizontales correspondientes se obtendrán de estos desplazamientos mayorados.

i. Hipótesis que da lugar a la máxima reacción vertical con el máximo desplazamiento horizontal concomitante:

Esta hipótesis permite comprobar la situación sísmica que proporciona la máxima reacción vertical, que da lugar a la mayor deformación tangencial por compresiones en el aislador, $\varepsilon_{c,El}$, y compromete la estabilidad a pandeo. En el puente de este ejemplo esta circunstancia se produce a largo plazo (t_{∞}), con la máxima carga permanente, componente sísmica vertical ($A_{Ed,z}$) predominante en sentido descendente, y gradiente térmico negativo con térmico uniforme de contracción concomitante. La figura 11 muestra un resumen de efectos de las acciones que dan lugar a esta hipótesis.

- t_{∞} : indica que son acciones a largo plazo, para maximizar la reacción hiperestática de pretensado en las pilas (menor reacción ascendente).
- $G_{\max(t_{\infty})}$: carga permanente máxima (máximo espesor de pavimento), para maximizar la reacción vertical.
- $P_{(t_{\infty})}$: carga de pretensado a largo plazo, con máxima reacción hiperestática en las pilas (menor reacción ascendente) y acortamiento elástico con pérdidas diferidas de cara al desplazamiento.
- $\psi_2 \cdot SC_{UDL}$: valor cuasipermanente de la sobrecargas de tráfico UDL. Solo usado para las reacciones y giros, según la expresión (1). La expresión (2) de desplazamientos no incluye la sobrecarga de tráfico. En las pilas, la sobrecarga de tráfico produce máxima compresión cuando todos los vanos están totalmente cargados.
- $\omega_N \psi_2 \cdot \Delta T_{N,con} + \psi_2 \Delta T_{M,heat}$: valor cuasipermanente del gradiente térmico negativo (cara superior del tablero a mayor temperatura que la inferior), que produce reacciones de compresión en las pilas. Se considera, además, el valor cuasipermanente del térmico uniforme de contracción concomitante con el gradiente térmico con factor de combinación $\omega_N = 0,35$.

- A_{Edx} , A_{Edy} y A_{Edz} : componentes de la acción sísmica. Se toma la componente A_{Edz} del sismo como dominante para que produzca la máxima reacción de compresión cuando actúa en sentido descendente. La comprobación del desplazamiento d_{bd} se realiza en la dirección principal X , que es la dirección horizontal más desfavorable puesto que el desplazamiento de cálculo por sismo, d_{bd} , se suma al desplazamiento longitudinal debido a las acciones no sísmicas, d_G , según la expresión (2).

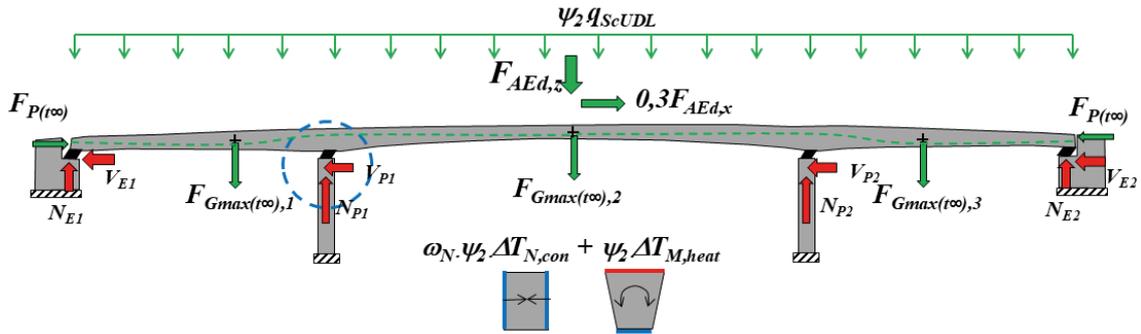


Figura 11 Esquema de fuerzas y deformaciones que producen la máxima compresión y el máximo desplazamiento horizontal concomitante en un aislador de estribo

Para las reacciones verticales y giros, la hipótesis considerada tiene en cuenta las acciones de la expresión (15), basada en la combinación de cálculo de la expresión (1), que es la que proporciona la máxima reacción vertical.

$$G_{max(too)} + P_{(too)} + 0,2Sc_{UDL} + 0,5\Delta T_{M,heat} + 0,3A_{Ed,x} + 0,3A_{Ed,y} + A_{Ed,z} \quad (15)$$

Las acciones consideradas en el cálculo de los desplazamientos horizontales son compatibles con (15), y a la vez se mantiene el criterio de la expresión (2) de no incluir la sobrecarga. Al tratarse de un puente recto y simétrico, no se producen torsiones de eje vertical debido a las componentes horizontales del sismo y por lo tanto la componente Y del sismo no va a contribuir a los desplazamientos en la dirección horizontal X . La componente Z del sismo tampoco contribuye a los desplazamientos en la dirección horizontal X . Por lo tanto, las acciones consideradas en el cálculo de los desplazamientos horizontales en la dirección principal X que se emplea para las comprobaciones vienen dadas por la expresión (16), y el desplazamiento máximo de cálculo en esa dirección X se obtiene con la expresión (17). Nótese que d_{bd} se obtiene con el 30 % de la acción sísmica en la dirección X ($0,3A_{Edx}$), ya que en esta hipótesis la componente dominante es la vertical (A_{Edz}).

$$G_{max(too)} + P_{(too)} + 0,3A_{Ed,x} \quad (16)$$

$$d_{max} = d_{max,x} = \gamma_x d_{bd,x} + d_{G,x} \quad (17)$$

II. Hipótesis que da lugar a la mínima reacción vertical con el máximo desplazamiento horizontal concomitante:

Esta hipótesis permite comprobar que no haya situaciones de tracción en el aislador y, además, puede ser la situación más condicionante frente a la estabilidad a rodamiento. En el puente de este ejemplo, esta circunstancia se puede dar en edades tempranas (t_0), con la máxima carga permanente, componente sísmica vertical ($A_{Ed,z}$) predominante en sentido ascendente, y gradiente térmico positivo con térmico uniforme de contracción concomitante. La figura 12 muestra un resumen de las fuerzas y deformaciones que intervienen en esta hipótesis.

- t_0 : indica que son acciones a corto plazo, para minimizar la reacción hiperestática de pretensado en las pilas (mayor reacción ascendente).
- $G_{min}(t_0)$: carga permanente mínima (mínimo espesor de pavimento), para obtener la mínima reacción vertical.
- $P_{(t_0)}$: carga de pretensado a largo plazo, para minimizar la reacción hiperestática en las pilas (mayor reacción ascendente) y acortamiento elástico con pérdidas diferidas de cara al desplazamiento.
- $\omega_N \psi_2 \cdot \Delta T_{N,con} + \psi_2 \cdot \Delta T_{M,cool}$: valor cuasipermanente del gradiente térmico positivo (cara superior del tablero a menor temperatura que la inferior). Se considera, además, el valor cuasipermanente del térmico uniforme de contracción concomitante con el gradiente térmico con factor de combinación $\omega_N = 0,35$.
- $A_{Ed,x}$, $A_{Ed,y}$ y $A_{Ed,z}$: componentes de la acción sísmica. Se toma la componente $A_{Ed,z}$ del sismo como dominante para que produzca una reacción ascendente cuando actúa en ese sentido. Para el cálculo de d_{bd} se adopta la dirección principal X para las comprobaciones, ya que es la dirección más desfavorable puesto que el desplazamiento de cálculo por sismo, d_{bd} , se suma con el desplazamiento longitudinal debido a las acciones no sísmica, d_G , según la expresión (2).

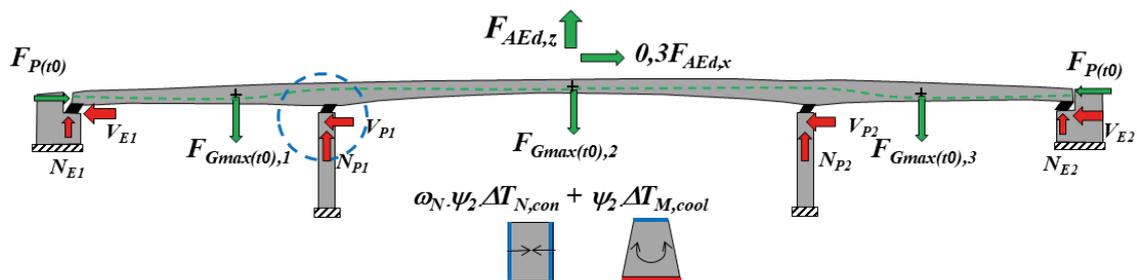


Figura 12 Esquema de fuerzas y deformaciones que producen la mínima compresión (o máxima tracción) y el máximo desplazamiento horizontal concomitante en un aislador de estribo

Para las reacciones verticales y giros, la hipótesis considerada tiene en cuenta las acciones de la expresión (18), basada en la combinación de cálculo de la expresión (1), que es la que proporciona la mínima reacción vertical.

$$G_{min(t0)} + P_{(t0)} + 0,5\Delta T_{M,heat} + 0,3A_{Ed,x} + 0,3A_{Ed,y} + A_{Ed,z} \quad (18)$$

Las acciones consideradas para el cálculo de los desplazamientos horizontales son compatibles con (18), y a la vez mantiene el criterio de la expresión (2) de no incluir la sobrecarga. Al tratarse de un puente recto y simétrico, no se producen torsiones de eje vertical debido a las componentes horizontales del sismo y por lo tanto la componente *Y* del sismo no va a contribuir a los desplazamientos en la dirección horizontal *X*. La componente *Z* del sismo tampoco contribuye a los desplazamientos en la dirección horizontal *X*. Por lo tanto, las acciones consideradas en el cálculo de los desplazamientos horizontales en la dirección principal *X* que se emplea para las comprobaciones vienen dadas por la expresión (19), y el desplazamiento máximo de cálculo en esa dirección *X* se obtiene con la expresión (20). Nótese que d_{bd} se obtiene con el 30 % de la acción sísmica en la dirección *X* ($0,3A_{Ed,x}$), ya que en esta hipótesis la componente dominante es la vertical ($A_{Ed,z}$).

$$G_{min(t0)} + P_{(t0)} + 0,3A_{Ed,x} \quad (19)$$

$$d_{max} = d_{max,x} = \gamma_x d_{bd,x} + d_{G,x} \quad (20)$$

III. Hipótesis que da lugar al máximo desplazamiento horizontal con la máxima compresión concomitante:

Esta hipótesis permite comprobar los aisladores frente a la máxima deformación tangencial que pueden sufrir en situación sísmica, debido al máximo cortante sísmico horizontal y la máxima compresión compatible. En el puente de este ejemplo esta circunstancia se produce a largo plazo (t_{∞}), con la máxima carga permanente, componente sísmica longitudinal ($A_{Ed,x}$) tomada como dirección principal de la acción sísmica, componente sísmica vertical ($A_{Ed,z}$) en sentido descendente, térmico uniforme de contracción y gradiente térmico negativo concomitante. La figura 13 muestra un resumen de efectos de las acciones que dan lugar a esta hipótesis.

- t_{∞} : indica que son acciones a largo plazo, para considerar los movimientos de acortamiento por retracción.
- $G_{max(t_{\infty})}$: carga permanente máxima (máximo espesor de pavimento), para maximizar la reacción vertical.
- $P_{(t_{\infty})}$: cargas de pretensado a largo plazo, que incluye el acortamiento elástico menos las pérdidas diferidas.

- $\psi_2 \cdot S_{C,UDL}$: valor cuasipermanente de la sobrecargas de tráfico UDL. Solo usado para las reacciones y giros, según la expresión (1). La expresión (2) de desplazamientos no incluye la sobrecarga de tráfico. En las pilas, la sobrecarga de tráfico produce máxima compresión cuando todos los vanos están totalmente cargados.
- $\psi_2 \cdot \Delta T_{N,con} + \omega_M \psi_2 \cdot \Delta T_{M,heat}$: valor cuasipermanente del térmico de contracción, para producir el máximo desplazamiento longitudinal. Se ha verificado que el efecto del acortamiento provocado por el 50 % del térmico de contracción, sumado a los acortamientos por pretensado y de retracción, da lugar al mayor desplazamiento no sísmico posible, según la expresión (2). Se considera, además, el valor cuasipermanente del gradiente térmico negativo (cara superior del tablero a mayor temperatura que la inferior) concomitante con el térmico uniforme con factor de combinación $\omega_M = 0,75$.
- A_{Edx} , A_{Edy} y A_{Edz} : componentes de la acción sísmica. Se toma la componente A_{Edx} del sismo como dominante y la dirección X como dirección principal en la comprobación de desplazamientos, para que produzca el máximo desplazamiento longitudinal. Cabe mencionar también que la componente vertical, A_{Edz} , se toma descendente, para maximizar la compresión sobre el apoyo.

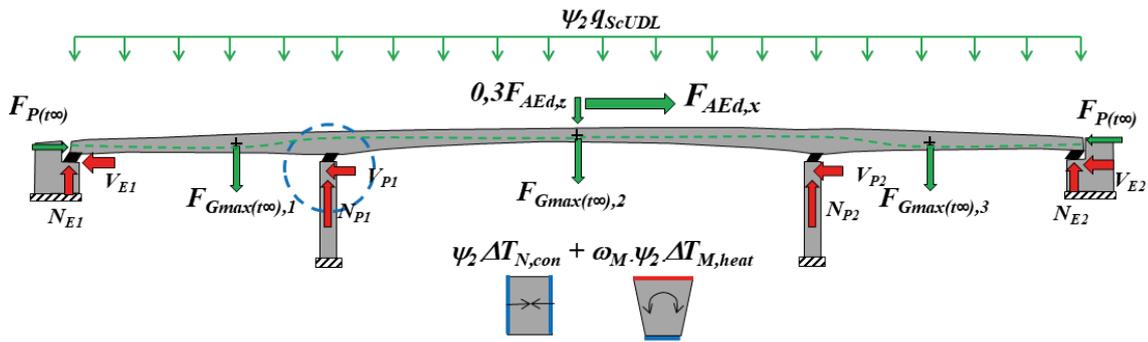


Figura 13 Esquema de fuerzas y deformaciones que producen el máximo desplazamiento y la máxima compresión concomitante en un aislador de estribo

Para las reacciones verticales y giros, la hipótesis considerada tiene en cuenta las acciones de la expresión (21), basada en la combinación de cálculo de la expresión (1), que es la que proporciona la mínima reacción vertical.

$$G_{max(t\infty)} + P_{(t\infty)} + 0,5\omega_M \Delta T_{M,cool} + A_{Ed,x} + 0,3A_{Ed,y} + 0,3A_{Ed,z} \quad (21)$$

Las acciones consideradas para el cálculo de los desplazamientos horizontales son compatibles con (21), y que a la vez mantiene el criterio de la expresión (2) de no incluir la sobrecarga. Al tratarse de un puente recto y simétrico, no se producen torsiones de eje vertical debido a las componentes horizontales del sismo y por lo tanto la componente Y del sismo no va a contribuir a los desplazamientos en la dirección horizontal X . La componente Z del sismo tampoco contribuye a los desplazamientos en la dirección horizontal X . Por lo tanto, las acciones consideradas en el cálculo de los desplazamientos horizontales en la dirección principal X que se emplea para las

comprobaciones vienen dadas por la expresión (22), y el desplazamiento máximo de cálculo en esa dirección X se obtiene con la expresión (23).

$$G_{max(t_{\infty})} + P_{(t_{\infty})} + 0,5\Delta T_{N,con} + A_{Ed,x} \quad (22)$$

$$d_{max} = d_{max,x} = \gamma_x d_{bd,x} + d_{G,x} \quad (23)$$

IV. Hipótesis que da lugar al máximo desplazamiento horizontal con la mínima compresión concomitante:

Esta hipótesis permite comprobar los aisladores frente al máximo cortante sísmico horizontal y la mínima compresión compatible, lo cual da lugar a la condición pésima de estabilidad frente a rodamiento. En el puente de este ejemplo, esta circunstancia se puede dar a largo plazo (t_{∞}), con la mínima carga permanente, componente sísmica longitudinal ($A_{Ed,x}$) tomada como dirección principal de la acción sísmica, componente sísmica vertical ($A_{Ed,z}$) en sentido ascendente, térmico uniforme de contracción y gradiente térmico positivo concomitante. La figura 14 muestra un resumen de efectos de las acciones que dan lugar a esta hipótesis.

- t_{∞} : indica que son acciones a largo plazo para considerar los movimientos de acortamiento por retracción.
- $G_{min(t_{\infty})}$: carga permanente mínima (mínimo espesor de pavimento), para minimizar la reacción vertical.
- $P_{(t_{\infty})}$: carga de pretensado a largo plazo, que incluye el acortamiento elástico menos las pérdidas diferidas.
- $\psi_2 \cdot \Delta T_{N,con} + \omega_M \psi_2 \cdot \Delta T_{M,heat}$: valor cuasipermanente del térmico de contracción, para producir el máximo desplazamiento longitudinal. Se ha verificado que el efecto del acortamiento provocado por el 50 % del térmico de contracción, sumado a los acortamientos por pretensado y de retracción, da lugar al mayor desplazamiento no sísmico posible, según la expresión (2). Se considera, además, el valor cuasipermanente del gradiente térmico positivo (cara superior del tablero a menor temperatura que la inferior) concomitante con el térmico uniforme con factor de combinación $\omega_M = 0,75$.
- A_{Edx} , A_{Edy} y A_{Edz} : componentes de la acción sísmica. Se toma la componente A_{Edx} del sismo como dominante y la dirección X como dirección principal de comprobación de desplazamientos, para que produzca el máximo desplazamiento longitudinal. Cabe mencionar también que la componente vertical, A_{Edz} , se toma descendente para maximizar la compresión sobre el apoyo.

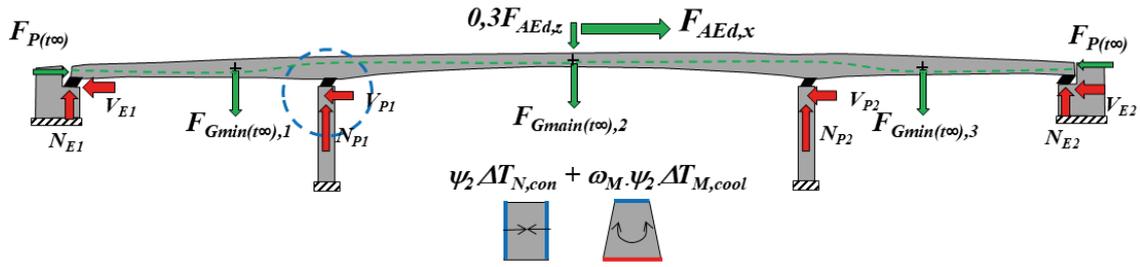


Figura 14 Esquema de fuerzas y deformaciones que producen el máximo desplazamiento y la máxima compresión concomitante en un aislador de estribo

Para las reacciones verticales y giros, la hipótesis de cargas tiene en cuenta las acciones de la expresión (24), basada en la combinación de cálculo de la expresión (1), que es la que proporciona la mínima reacción vertical.

$$G_{min(t_{\infty})} + P_{(t_{\infty})} + 0,5\omega_M\Delta T_{M,heat} + A_{Ed,x} + 0,3A_{Ed,y} + 0,3A_{Ed,z} \quad (24)$$

Las acciones consideradas para el cálculo de los desplazamientos horizontales son compatibles con (24), y a la vez mantiene el criterio de la expresión (2) de no incluir la sobrecarga. Al tratarse de un puente recto y simétrico, no se producen torsiones de eje vertical debido a las componentes horizontales del sismo y por lo tanto la componente *Y* del sismo no va a contribuir a los desplazamientos en la dirección horizontal *X*. La componente *Z* del sismo tampoco contribuye a los desplazamientos en la dirección horizontal *X*. Por lo tanto, las acciones consideradas en el cálculo de los desplazamientos horizontales en la dirección principal *X* que se emplea para las comprobaciones vienen dadas por la expresión (25), y el desplazamiento máximo de cálculo en esa dirección *X* se obtiene con la expresión (26).

$$G_{min(t_{\infty})} + P_{(t_{\infty})} + 0,5\Delta T_{N,con} + A_{Ed,x} \quad (25)$$

$$d_{max} = \gamma_x d_{bd} + d_G = \gamma_x d_{bd,x} + d_{G,x} \quad (26)$$

4.3.4 Consideración de aislador elastomérico sometido a acciones sísmicas pequeñas

Algunas comprobaciones dependerán de si se desea considerar que el aislador está sometido a "acciones sísmicas pequeñas" o no bajo el terremoto de proyecto. El concepto de sometido a "acciones sísmicas pequeñas" lo emplea únicamente la norma UNE-EN 15129; no se emplea en la norma sísmica UNE-EN 1998. Su nombre puede llevar a confusión ya que da la impresión de que está directa y únicamente relacionado con la peligrosidad sísmica del lugar, cuando en realidad lo que trata es de diferenciar entre aisladores elastoméricos en los cuales los efectos de las acciones sísmicas son pequeños en comparación con los efectos de las acciones no

sísmicas, y los que no. En este sentido, hubiese sido más apropiado denominarlos aisladores elastoméricos sometidos a "efectos pequeños de las acciones sísmicas".

UNE-EN 15129 establece que un aislador elastomérico se puede considerar sometido a "acciones sísmicas pequeñas" cuando se cumplen unas condiciones en desplazamientos y fuerzas que establece UNE-EN 15129 en el apartado 8.2.1.1. Si se considera el LDRB como sometido a "acciones sísmicas pequeñas" porque cumple estos requisitos, se le exige del cumplimiento de los requisitos que establece la norma UNE-EN 15129 (salvo el 8.2.1.2.11, el 8.2.1.2.2 con las modificaciones que introduce 8.2.1.2.11, el 8.2.1.2.4 con las modificaciones que introduce 8.2.1.2.11, el 8.2.1.2.7 con las modificaciones que introduce 8.2.1.2.11, el 8.2.3.4.2 y el 8.2.3.4.4 o 8.2.3.4.5 según si el sistema de fijación del aislador permite desarrollar fuerzas de tracción verticales o no). En contrapartida, sólo serán admisibles deformaciones tangenciales máximas del 200 % ($\varepsilon_{q,max} \leq 2$).

Los aisladores podrán considerarse sometidos a acciones sísmicas pequeñas si se cumple que el desplazamiento sísmico de cálculo, d_{bd} , obtenido con propiedades de límite inferior (LBDP) y la fuerza horizontal sísmica de cálculo, V_{bd} , obtenida con propiedades de límite superior (UBDP) son menores que el desplazamiento, d_G , y la fuerza, V_G , debidos a acciones no sísmicas (no mayoradas), obtenidos según se indica en el apartado 4.3.1 de esta guía, es decir, $d_{bd} < d_G$ y $V_{bd} < V_G$.

Nótese que la norma define los desplazamientos d_{bd} en cada dirección horizontal principal. Por lo tanto, la comprobación anterior hay que hacerla independientemente en cada una de las dos direcciones horizontales principales. En los resultados de los cálculos que se exponen más adelante, únicamente se muestran los correspondientes a la dirección más desfavorable.

Comentario: para el análisis de la condición $d_{bd} < d_G$, d_{bd} y d_G se deberían obtener con el límite inferior de propiedades, $d_{bd,LB}$ y $d_{G,LB}$. Para el análisis de la condición $V_{bd} < V_G$, V_{bd} y V_G se deberían obtener con el límite superior de propiedades, $V_{bd,UB}$ y $V_{G,UB}$. Sin embargo, las variabilidades de propiedades afectarán de igual manera a las fuerzas y desplazamientos de la acción sísmica como de las no sísmicas (misma temperatura, mismo deterioro, misma variabilidad de producción, etc.). Por tanto, únicamente influirá en la comparación el efecto debido a la aplicación rápida de las cargas (ver apartado 5.1 de esta guía): utilización de G dinámico según UNE-EN 15129 para la acción sísmica frente a G_g nominal aparente según UNE-EN 1337-3 para las no sísmicas; o bien utilizar G_g en ambos casos, pero con la aplicación de un coeficiente de cortante dinámico, α , para la acción sísmica según el apartado 7.5.2.4(5) de UNE-EN 1998.

En el ejemplo contemplado en esta guía la acción sísmica será relevante, tal y como se demuestra en las comprobaciones más adelante, ya que se ha elegido un emplazamiento de alta sismicidad.

5

PROPIEDADES DE CÁLCULO

5.1 Parámetros geométricos

5.1.1 Parámetros de dimensión de los componentes de los aisladores elastoméricos

Los aisladores elastoméricos contemplados en UNE-EN 15129 pueden tener forma rectangular o circular, según se indica en el apartado 8.2.3.2 de dicha norma. Deben estar constituidos por capas alternas de material elastómero y de placas de acero. Entre las placas de acero se distingue entre las placas de zunchado interiores, que deben tener todas el mismo espesor nominal, y las placas de extremo, que son más gruesas que las de zunchado interiores. Las placas de zunchado interiores se adhieren al material elastómero en condiciones apropiadas de calor y presión mediante un proceso de vulcanización. Las placas de extremo deben estar adheridas en caliente al material elastómero. Las caras laterales del aislador elastomérico deben recubrirse con una capa de al menos 4 mm de material elastómero de las mismas características y con el mismo tiempo de curación que el que compone las capas de material elastómero entre las placas de zunchado (salvo que se demuestre resistencia al fuego).

En la figura 15 se detalla la definición geométrica de los aisladores elastoméricos particularizada a cada tipo de aislador según el método de anclaje. Se muestra a continuación un alzado esquemático de aislador elastomérico de bajo amortiguamiento para una de las modalidades de anclaje más comunes:

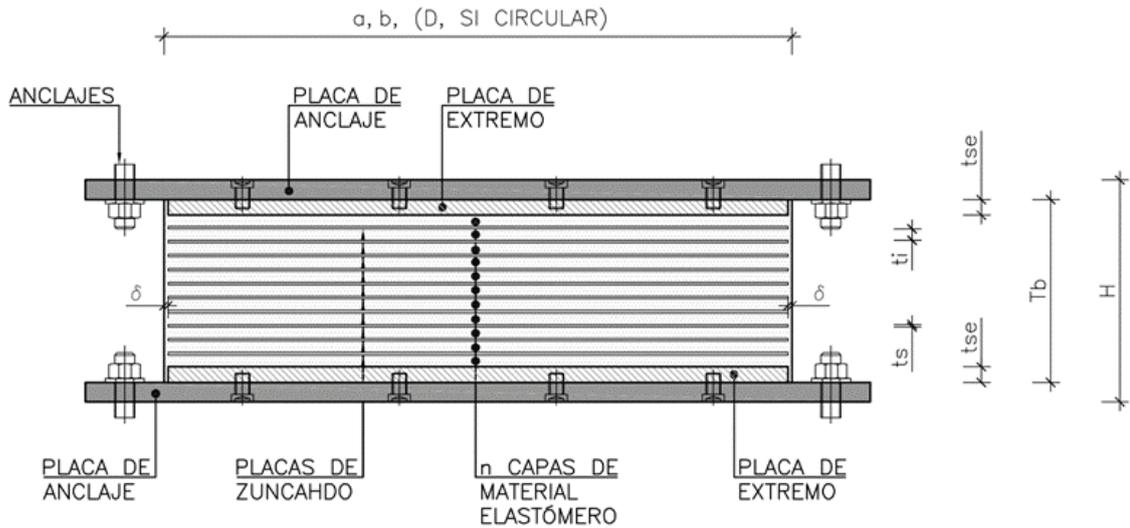


Figura 15 Alzado tipo de aisladores elastomérico LDRB normalizado con unión atornillada de las placas de extremo a las placas de anclaje

donde:

- a, b son las dimensiones en planta de un aislador elastomérico rectangular
- a', b' son las dimensiones efectivas en planta (coincidentes con las dimensiones de las placas de zunchado) de un aislador elastomérico rectangular
- D es el diámetro de un aislador elastomérico circular
- D' es el diámetro efectivo (coincidente con el diámetro de las placas de zunchado) de un aislador elastomérico circular
- t_i espesor de capa interior de material elastómero ($t_i = t_r$ en aisladores elastoméricos)
- t_s espesor de la placa de zunchado interior
- t_{se} espesor de las placas de extremo
- n número de capas interiores material elastómero
- δ espesor de recubrimiento lateral mediante material elastómero
- T_q es el espesor total del material elastómero que deforma a cortante
- T_b altura del aislador elastomérico entre placas de anclaje
- H altura total del aislador incluidas las placas de anclaje

5.1.2 Área total, A , área efectiva, A' y A_I , y área efectiva reducida, A_r , del apoyo

Los parámetros A , A' , A_I y A_r del aislador elastomérico se definen en UNE-EN 1337-3 y UNE-EN 15129, así como en la *Guía para el cálculo de apoyos elastoméricos* [18] y en la *Guía para el cálculo de aisladores elastoméricos de bajo amortiguamiento en zona sísmica* [20].

El área total en planta del elastómero, A , es el área en planta ocupada por el elastómero. El área efectiva del aislador elastomérico, A' , se corresponde con el área en planta delimitada por las placas de zunchado, es decir, $A' = a' \cdot b'$ en aisladores rectangulares; $A' = \pi \cdot D'^2/4$ en aisladores circulares. El área efectiva del aislador elastomérico descontando agujeros, A_I , se corresponde con el área en planta confinada, es decir, el área común al elastómero y a las placas de acero, descontando el área de los agujeros interiores no taponados. En general, en aisladores elastoméricos LDRB no habrá agujeros interiores, por lo que $A_I = A'$.

El área en planta efectiva reducida del apoyo, A_r , está relacionada con el área disponible para transmisión de las cargas verticales una vez deformado el aislador frente a las acciones horizontales no sísmicas de la combinación sísmica, $v_{G,x}$ y $v_{G,y}$, según se indica en los apartados 8.2.3.1 y 8.2.3.2 de UNE-EN 15129, es decir, las debidas a las acciones que introducen deformaciones horizontales de la expresión (1). El valor de A_r se obtiene mediante la expresión (27) que es función de los tamaños de las placas de zunchado a' y b' en aisladores rectangulares.

$$A_r = A_I \left(1 - \frac{v_{G,x}}{a'} - \frac{v_{G,y}}{b'} \right) \quad (27)$$

Comentario: En la versión más avanzada, a fecha de redacción de esta guía, del borrador (2018) de la 2.^a generación de la norma EN 1337-3, se incluye una formulación particular para el cálculo de A_r , según se muestra en la expresión (28).

$$A_{r,circ} = \frac{1}{2} \left[\frac{4 \cdot A'}{\pi} \cdot \arcsen \left(\frac{\sqrt{D'^2 - v_{G,xy}^2}}{D'} \right) - \left(v_{G,xy} \sqrt{D'^2 - v_{G,xy}^2} \right) \right] \quad (28)$$

5.1.3 Factor de forma, S

El factor de forma es la relación del área en planta efectiva de una capa de material elastómero, A_I , respecto al área de su superficie lateral libre de fuerzas, $l_p \cdot t_r$, de una capa de elastómero de espesor t_r ($t_r = t_i$ en aisladores elastoméricos), siendo l_p el perímetro del aislador ($l_p = 2 \cdot (a' + b')$ en aisladores rectangulares; $l_p = \pi D'$ en circulares).

$$S = \frac{A_I}{l_p \cdot t_r} \quad (\text{para una capa de elastómero individual}) \quad 29$$

5.2 Módulo de elasticidad transversal, G

5.2.1 Propiedades nominales de G

Se considera un elastómero con un módulo de elasticidad transversal convencional aparente, G_g , de 0,9 MPa, que es un valor típico para aisladores LDRB. El valor nominal de cálculo en aisladores, G , (o G_{dyn}) corresponde al módulo de elasticidad transversal nominal, que se obtiene mediante ensayo cíclico según el apartado 8.2.2.1.3.2 de UNE-EN 15129 para una deformación de cizallamiento del 100 % a 23 °C. A falta de esta información, el valor modificado de G frente a acciones dinámicas sísmicas puede estimarse mediante la formulación recogida en el apartado 7.5.2.4 de UNE-EN 1998-2, que supone incrementar G_g por un coeficiente de amplificación de la rigidez por acción sísmica, α , que normalmente está comprendido entre 1,10 y 1,40. En el presente caso práctico, se tomará un valor medio de $\alpha = 1,25$ para la obtención del módulo de elasticidad transversal nominal de cálculo:

$$G = \alpha G_g = 1,25 \cdot 0,9 = 1,125 \text{ MPa}$$

Los valores de $\alpha = 1,00$ y $\alpha = 1,40$, proporcionan unos valores extremos de propiedades de las acciones en situación sísmica, y que por tanto se incluyen en el análisis de variabilidad de propiedades del siguiente apartado.

$$G_{max} = \alpha_{max} G_g = 1,40 \cdot 0,9 = 1,26 \text{ MPa}$$

$$G_{min} = \alpha_{min} G_g = 1,00 \cdot 0,9 = 0,90 \text{ MPa}$$

Comentario: se ha adoptado un valor $\alpha = 1,0$ en vez de 1,1, para el menor valor de G , para así tener en cuenta la posibilidad de que las acciones no sísmicas de las comprobaciones sísmicas entren en las mismas con su valor de G correspondiente a cargas lentas, resultando en un cálculo conservador, y simplificando el cálculo. Alternativamente, podría adoptarse $\alpha = 1,1$, pero al combinarse las acciones no sísmicas en situación sísmica, estas habrían de haberse obtenido con G_g (o G_{min} con $\alpha = 1,0$) correspondiente a deformaciones lentas.

Otro enfoque distinto consiste en adoptar un valor de $G = 0,3-1,5$ MPa, o utilizar valores de referencia de catálogos de fabricantes (generalmente, $G = 0,6-1,0$ MPa), y prescribirlo en proyecto como parámetro a alcanzar por el fabricante, ya que este debe consignar siempre el valor de G mediante ensayo cíclico según el apartado 8.2.2.1.3.2. de UNE-EN 15129 para una deformación de cizallamiento del 100 % a 23 °C. De esta forma, sólo se utiliza un valor de G (sin necesidad de α) para el análisis de aislamiento sísmico y sus comprobaciones. En cambio, para las comprobaciones de las combinaciones no sísmicas según UNE-EN 1337-3 (que en general no serán condicionantes), sí que será necesario estimar en proyecto el valor de G_g , que se podría estimar utilizando la gama de coeficiente de cortante dinámico para reducir el valor de G prescrito en proyecto, de tal forma que se hagan las comprobaciones de UNE-EN 1337-3 con $G_g = G/1,4$ y $G_g = G/1,0$ (se recomienda $\alpha = 1,0$ en vez de 1,1 del lado de la seguridad). Este enfoque permite un

cálculo del aislador sísmico más preciso, ya que se extrae del análisis sísmico el factor α , y por tanto puede ser más adecuado cuando la sismicidad es moderada-alta o alta y se requiere un mejor ajuste de los aisladores proyectados.

5.2.2 Variabilidad de propiedades

Se tiene que considerar la variabilidad del valor nominal (DP) de G y calcular su límite superior (UBDP) e inferior (LBDP) con las fórmulas del anexo J de UNE-EN 1998-2, que es normativo. El anexo J de UNE-EN 1998-2 no proporciona valores máximos obligatorios de los factores de variabilidad, $\lambda_{max,fi}$, de cada propiedad. Tampoco obliga a tomar unos valores mínimos, $\lambda_{min,fi}$, aunque establece como recomendación tomar $\lambda_{min,fi} = 1$ para las propiedades de envejecimiento, temperatura, contaminación y recorrido acumulativo. Es en el anexo JJ de UNE-EN 1998-2 (de carácter informativo, según el Anejo Nacional) donde se recomienda unos valores de $\lambda_{max,fi}$ para aisladores comunes. Sin embargo, en aras de un cálculo más conservador, y con el objetivo de mostrar una mayor variabilidad en el análisis, en esta guía práctica no se van a emplear los valores de $\lambda_{max,fi}$ recomendados en el anexo JJ de UNE-EN 1998-2, sino los que recomienda UNE-EN 15129 en el anexo J (informativo) y en el apartado 8.2.1.1, que son en algunos casos distintos. El uso de los valores de UNE-EN 15129, permite tener en cuenta la variabilidad por producción (artículo 8.2.1.1), que no está contemplada en UNE-EN 1998-2. Se muestran en la tabla 7 los factores de variabilidad, $\lambda_{max,fi}$ y $\lambda_{min,fi}$ de las propiedades tenidos en cuenta en este ejemplo:

Tabla 7 Factores de variabilidad de propiedades

Propiedad	UBDP $\lambda_{max,fi}$	LBDP $\lambda_{max,fi}$
Envejecimiento (λ_{f1})	1,1	1,0 ^b
Temperatura (λ_{f2}) ^a	1,4	1,0 ^b
Contaminación (λ_{f3})	1,0	1,0 ^b
Recorrido acumulativo (λ_{f4})	1,0	1,0 ^b
Producción (λ_{f5})	1,2	0,8

^a Temperatura mínima de cálculo $T_{min} = -12,2^{\circ}\text{C}$.

^b Puede suponerse en general este valor según anexo J de UNE-EN 1998-2.

Los factores de variabilidad de propiedades, $\lambda_{max,fi}$ y $\lambda_{min,fi}$, deben combinarse según los coeficientes de combinación de variabilidades ψ_{fi} del anexo J (normativo) de UNE-EN 1998-2 para obtener los coeficientes de modificación con los que se obtienen las UBDP y LBDP $\lambda_{U,fi}$ y $\lambda_{L,fi}$, según la expresión (J.5) del anexo JJ de UNE-EN 1998-2. Respecto al ψ_{fi} por envejecimiento, el anexo J (normativo) de la norma UNE-EN 1998-2 establece un valor genérico $\psi_{fi} = 0,7$ mientras que el apartado 8.2.1.1 de UNE-EN 15129 indica un valor $\psi_{fi} = 1,0$. En este ejemplo, por

coherencia, se ha adoptado $\psi_{fi} = 1,0$ para el envejecimiento dado que los valores del resto de parámetros están tomados de UNE-EN 15129, ya que es más conservador que adoptar 0,7.

$$\lambda_{U,fi} = 1 + (\lambda_{max,fi} - 1) \Psi_{fi} \quad (30)$$

$$\lambda_{L,fi} = 1 + (\lambda_{min,fi} - 1) \Psi_{fi} \quad (31)$$

Tabla 8 Coeficientes de combinación y coeficientes de modificación de propiedades

Propiedad	ψ_{fi}	UBDP ($\lambda_{U,fi}$)	LBDP ($\lambda_{L,fi}$)
Envejecimiento (ψ_{f1})	1,0	1,1	1,0
Temperatura (ψ_{f2})	0,7	1,28	1,0
Producción (ψ_{f5})	0,7	1,14	0,86

Nota: No se incluyen las propiedades de contaminación y recorrido acumulativo debido a que sus factores de variabilidad son igual a 1.

Los valores límite de cálculo, UBDP y LBDP, para el análisis sísmico y las comprobaciones según UNE-EN 15129 se obtienen con la siguiente expresión (J.4) del anejo J (normativo) de UNE-EN 1998-2:

$$UBDP : G_{UB} = G_{max} \cdot \lambda_{U,f1} \cdot \lambda_{U,f2} \cdot \lambda_{U,f5} = 1,26 \cdot 1,1 \cdot 1,28 \cdot 1,14 \approx 2,00 \text{ MPa}$$

$$LBDP : G_{LB} = G_{min} \cdot \lambda_{L,f5} = 0,90 \cdot 0,86 \approx 0,77 \text{ MPa}$$

Se deberá realizar un doble cálculo: uno utilizando las propiedades UBDP y otro con las propiedades LBDP. Normalmente, el primero conduce a las máximas fuerzas en la subestructura y en el tablero, y el segundo a los máximos desplazamientos del sistema de aislamiento y del tablero, aunque no siempre es así. No es el caso de este ejemplo, pero puede ocurrir con aisladores no lineales en los cuales el periodo efectivo, T_{eff} , y la fracción de amortiguamiento efectivo, ξ_{eff} , dependen del desplazamiento máximo, que el incremento de fuerzas debido a la disminución de ξ_{eff} cuando se emplean LBDP, domine sobre la reducción de fuerzas debido al aumento T_{eff} .

Según el apartado 7.5.2.4 de UNE-EN 1998-2, el análisis multimodal o el análisis en el dominio del tiempo pueden llevarse a cabo basándose únicamente en las propiedades nominales (DP) si se demuestra mediante el método de análisis basado en el modo fundamental (ver apartado 6.2 de esta guía) que los desplazamientos sísmicos de cálculo respecto del suelo, d_{cd} , utilizando las propiedades UBDP y LBDP no difieren en $\pm 15\%$ respecto del obtenido con las propiedades nominales (DP).

5.2.2.1 Variabilidad de las propiedades para verificar los aisladores elastoméricos como “sencillos” según UNE-EN 1998-2

Cuando se desee verificar los aisladores elastoméricos “sencillos” según el apartado UNE-EN 1998-2, su apartado 7.5.2.4(6) permite adoptar una simplificación en la obtención de las propiedades de límite superior e inferior.

- UBDP: siempre que $T_{min} < 0^\circ\text{C}$ puede considerarse que G_{UB} (en adelante $G_{UB,sen}$ para el caso de aisladores “sencillos”) adopta un valor de $G_{UB,sen} = 1,2 \cdot G_{max}$. En caso contrario, se obtiene según el anexo JJ de UNE-EN 1998-2 considerando sólo los factores de variabilidad de envejecimiento, $\lambda_{max,f1}$, y temperatura, $\lambda_{max,f2}$. Como en este ejemplo $T_{min} = -12,2^\circ\text{C}$, se utiliza el anejo JJ.

Tabla 9 Coeficientes de combinación y coeficientes de modificación de propiedades para aisladores elastoméricos “sencillos”

Propiedad	ψ_{fi}	UBDP ($\lambda_{U,fi}$)
Envejecimiento (ψ_{f1})	0,7	1,07
Temperatura (ψ_{f2})	0,7	1,21

Nótese que los aisladores elastoméricos “sencillos” no están incluidos en UNE-EN 15129 y, por tanto, la variabilidad de propiedades debe obtenerse con los anexos J y JJ de UNE-EN 1998-2, y no con el anexo J de UNE-EN 15129, que son más conservadores. Por ello, para la consideración de los aisladores elastoméricos “sencillos” se han considerado factores de variabilidad de valor $\lambda_{max,f1} = 1,10$ y $\lambda_{max,f2} = 1,30$, y se han combinado ambos con un coeficiente de combinación de propiedades $\psi_{f1} = \psi_{f2} = 0,7$, para una clase de importancia de la infraestructura II (ver apartado 4.1 de esta guía).

$$G_{UB,sen} = G_{max} \cdot \lambda_{U,f2} \cdot \lambda_{U,f1} = 1,26 \cdot 1,07 \cdot 1,21 = 1,63 \text{ MPa}$$

- LBDP: puede considerarse que G_{LB} (en adelante $G_{LB,sen}$ para el caso de aisladores “sencillos”) adopta un valor de $G_{LB,sen} = G_{min}$

$$G_{LB,sen} = G_{min} = 0,90 \text{ MPa}$$

5.3 Módulo de compresión, E_c

El módulo de compresión de una capa de elastómero, según se define en el apartado F.3.3.1 del anexo F de UNE-EN 15129, se obtiene combinando en serie el módulo de compresión según el factor de forma, $E_{l,c}$, y el módulo de compresibilidad volumétrica, E_b , que puede tomarse como $E_b = 2.000 \text{ MPa}$:

$$\frac{1}{E_c} = \frac{1}{E_{1,c}} + \frac{1}{E_b} \quad (32)$$

El módulo de compresión, $E_{1,c}$, depende del valor nominal del módulo de cizallamiento, G , y del factor de forma del aislador, S :

$$E_{1,c} = 3G(1 + 2S^2) \quad (33)$$

Dado que G adopta distintos valores según el límite de propiedades considerados (DP, UBDP y LBDP), el valor de $E_{1,c}$ puede ser:

$$UBDP: E_{1,cUB} = 3G_{UB}(1 + 2S^2)$$

$$LBDP: E_{1,cLB} = 3G_{LB}(1 + 2S^2)$$

5.4 Rigidez y amortiguamiento efectivo

Según indica el apartado 7.5.1(3) de UNE-EN 1998-2, los aisladores de bajo amortiguamiento (LDRB) pueden modelizarse como resortes lineales y elásticos, y su rigidez horizontal efectiva puede considerarse constante e igual a la rigidez lateral elástica inicial K_b de un apoyo elastomérico calculado con UNE-EN 1337-3, dada por la expresión (34). El amortiguamiento efectivo total de la estructura, ξ_{eff} , puede tomarse hasta del 6 % (apartado 7.5.2.3.3(2) de UNE-EN 1998-2), y hasta el 5 % si se trata de LDRB "sencillos" (apartado 7.5.2.4(5) de UNE-EN 1998-2). En este ejemplo se considerará un amortiguamiento efectivo total de $\xi_{eff} = 0,05$ (5 %), para el cual el coeficiente de corrección de amortiguamiento efectivo, η_{eff} (apartado 7.5.4 de UNE-EN 1998-2), vale $\eta_{eff} = 1$.

Por tanto, para aisladores elastoméricos de bajo amortiguamiento (LDRB) las propiedades efectivas quedarían como:

$$K_{eff,b} \approx K_b = \frac{F_h}{u_h} = \frac{A \cdot G}{T_q} \quad (34)$$

$$\xi_{eff,b} = \xi_{eff} = 0,05 \quad (35)$$

donde:

- A_l es el área horizontal efectiva del aislador (apartado 7.5.2.3.3(2) de UNE-EN 1998-2 y apartado 5.3.3.1 de UNE-EN 1337-3), es decir, el área común al elastómero y a la placa de acero de refuerzo, excluyendo posibles agujeros si estos no se rellenan con posterioridad, en m^2
- G valor nominal del módulo de elasticidad transversal o cizallamiento frente a acciones dinámicas (ver el apartado 5.1 de esta guía), en kN/m^2
- T_q espesor total de elastómero, en m

Para la modelización de los aisladores en el presente ejemplo, se han adoptado las siguientes hipótesis habituales en la práctica:

- Rigidez vertical del aislador infinita: la rigidez vertical de pilas y aisladores es muy elevada como para tener influencia apreciable en los resultados.
- Rigidez a giro de eje horizontal nula: resultará en mayores giros del apoyo, con los que se realizarán las comprobaciones.
- Rigidez torsional nula: no son esperables torsiones de eje vertical del tablero dada las condiciones de simetría del mismo y de sus apoyos

Comentario: la rigidez efectiva, $K_{eff,b}$, es la rigidez secante asociada al desplazamiento máximo del aislador. Como la norma permite modelizar los aisladores LDRB como resortes lineales y elásticos, se emplea para ellos la rigidez elástica inicial de los aisladores, K_b , como rigidez efectiva ($K_b \approx K_{eff,b}$) y el amortiguamiento asociado al periodo de vibración en régimen elástico $\xi_{v,b}$ (que no debe superar el 6 %) como amortiguamiento efectivo $\xi_{eff,b} = \xi_{v,b}$. El motivo de esta consideración es que los aisladores de bajo nivel de amortiguamiento exhiben unos ciclos de deformación muy esbeltos, que son próximos a una recta. En aisladores distintos de los LDRB, con mayor capacidad de disipación, como por ejemplo los LRB, cuando entran en la zona no lineal, $K_{eff,b}$ debe obtenerse mediante un procedimiento iterativo. Con la rigidez total K_{eff} proporcionada por todos los aisladores y teniendo en cuenta en su caso la deformación de la subestructura, se calcula la fracción de amortiguamiento efectivo total del sistema con la expresión (7.5) de UNE-EN 1998-2:

$$\xi_{eff} = \frac{1}{4\pi} \frac{E_D}{E_S} = \frac{1}{2\pi} \frac{E_D}{K_{eff,b} \cdot d_{bd}^2} \quad (36)$$

donde d_{cd} es el desplazamiento máximo en el centro de rigidez del tablero y E_D es la energía disipada por el aislador en un ciclo de desplazamiento de amplitud d_{cd} , y E_S es la energía de deformación elástica.

En este ejemplo se ha considerado que todos los aisladores proporcionan la misma fracción de amortiguamiento $\xi_{eff,b} = 0,05$ (5%), pero si el LDRB cumple UNE-EN 15129, se puede adoptar un valor de hasta el 6%. En tal caso, el espectro de cálculo del apartado 4.1 se reduce en ordenadas espectrales mediante el coeficiente corrector por amortiguamiento η_{eff} , que para una fracción de amortiguamiento total del 6% vale $\eta_{eff} = 0,95$, para tener en cuenta el amortiguamiento adicional del 1% respecto al 5% del espectro de respuesta de cálculo. Nótese que, en el método multimodal espectral, se permite considerar que los modos de vibración con periodo superior a $0,8T_{eff}$ tienen la misma fracción de amortiguamiento dada por la expresión ξ_{eff} , y en consecuencia esta reducción aplica solo a los modos con periodos superiores a $0,8T_{eff}$, según indica el apartado 7.5.5(4) de UNE-EN 1998-2, resultando en el espectro de la figura 16 para el periodo efectivo, T_{eff} , que se obtiene en el ejemplo resuelto mediante el método multimodal del apartado 9.4 de esta guía.

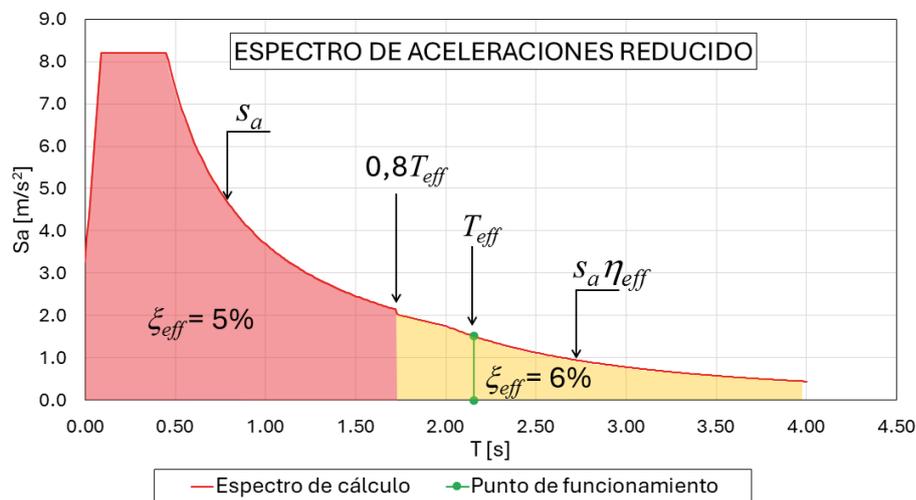


Figura 16 Espectro horizontal de cálculo reducido en caso de considerar $\xi_{eff,b} = 6\%$

5.5 Rigidez de la estructura para el cálculo sísmico

En estructuras con aislamiento de base, la norma UNE-EN 1998-2 únicamente permite soluciones de "aislamiento total", es decir, no se permiten reducciones de fuerzas sísmicas (adicionales a las obtenidas con el sistema de aislamiento) por ductilidad a través de la formación de rótulas plásticas en las pilas. En puentes aislados sísmicamente la respuesta de la subestructura y superestructura debe suponerse como de ductilidad limitada ($q \leq 1,5$) o esencialmente elástica ($q = 1,0$), según los apartados 7.3(2)P y 7.6.3(2) de UNE-EN 1998-2. En el caso de las cimentaciones, estas deben proyectarse para que permanezcan en régimen elástico ($q = 1,0$) (artículo 5.8.1(1)P de UNE-EN 1998-2). Es decir, las fuerzas sísmicas de cálculo a emplear en la comprobación de la superestructura y de la subestructura deben ser las obtenidas de un cálculo elástico divididas como máximo por un factor $q \leq 1,5$. Es importante resaltar que el valor $q = 1,5$ está asociado a la sobrerresistencia de la estructura y no a su capacidad de deformación plástica mediante la formación de rótulas plásticas.

El apartado 2.3.6.1(3) de UNE-EN 1998-2 indica que la rigidez a considerar en las pilas proyectadas para ductilidad limitada puede ser la rigidez secante correspondiente al inicio de la plastificación del acero (en estructuras de hormigón armado) o bien utilizar las propiedades brutas (no fisuradas), o un valor que se determine por procedimientos más refinados. Si las pilas se proyectan con $q = 1$ para un comportamiento "esencialmente elástico" deberían emplearse las rigideces brutas (sin fisurar) ya que se está suponiendo que tanto acero como hormigón se mantienen elásticos. Dado que la rigidez del sistema aislador-pila vendrá gobernada por la pila, se ha optado por mantener las inercias brutas. Las rigideces laterales brutas de las pilas, correspondientes a un fuste circular de 1,2 m de diámetro, en hormigón armado, y con alturas 9,0 y 9,3 m:

$$K_{P,1} = 3 \frac{EI}{H_1^3} = 3 \frac{3,3 \cdot 10^7 \cdot 0,102}{9,00^3} = 13.823 \text{ kN/m}$$

$$K_{P,2} = 3 \frac{EI}{H_2^3} = 3 \frac{3,3 \cdot 10^7 \cdot 0,102}{9,30^3} = 12.528 \text{ kN/m}$$

Los estribos se consideran infinitamente rígidos: $K_E \approx \infty$

La rigidez a torsión de eje longitudinal del tablero en el modelo de cálculo se reduce a un 50 % de la inercia a torsión bruta, según el apartado 2.3.6.1(4) de UNE-EN 1998-2.

5.6 Masa de la estructura para el cálculo sísmico

Las masas a considerar en el cálculo sísmico con el método del modo fundamental serán las correspondientes a las acciones que aportan masa en el tablero (elemento aislado) según la combinación sísmica de cálculo de 6.4.3.4 de UNE-EN 1990: peso propio del tablero, carga muerta del tablero y el valor cuasipermanente de la sobrecarga uniforme. Este valor cuasipermanente se obtiene multiplicando la sobrecarga por el factor ψ_2 que determine el Anejo Nacional, variando los valores recomendados de UNE-EN 1998-2 entre 0 y 0,3. Se deben emplear los valores medios de las cargas permanentes que se pueden tomar igual a sus valores característicos (apartado 4.1.2 de UNE-EN 1998-2).

Es importante mencionar que, cuando se utilice el método del modo fundamental mediante la consideración de tablero rígido, hay que añadir como masa inercial adicional a la del tablero la correspondiente a la mitad superior de las pilas, según se indica en el apartado 4.2.2.3 de UNE-EN 1998-2.

Comentario: referencias como la AASHTO *Guide specifications for seismic isolation design* [7] añaden en sus ejemplos prácticos entre un 15 % y un 30 % del peso de la subestructura susceptible de ser movilizada. Este porcentaje puede ajustarse comparando con la respuesta del primer modo en un cálculo modal espectral con un modelo global.

En este sentido, las masas consideradas en este ejemplo para el cálculo por el método del modo fundamental son:

Tabla 10 Masas movilizadas en el cálculo sísmico mediante el modo fundamental

Carga con aporte de masa	Masa
Peso propio del tablero	11.964 kN = 1.219,57 Tn
50 % Peso propio de pilas	133 kN = 13,71 Tn
Carga muerta máxima	3.030 kN = 308,87 Tn
0,2 · Sobrecarga uniforme ($\psi/2$)	606 kN = 61,77 Tn
TOTAL	15.733 kN = 1.603,92 Tn

Cuando se emplea el método multimodal las masas de la superestructura y de la subestructura se distribuyen en el modelo 3D o se concentran en los nodos del mismo de acuerdo con los grados de libertad elegidos (apartado 4.1.2(2) de UNE-EN 1998-2).

6

METODOLOGÍA DE CÁLCULO

El análisis de aproximación y pre-dimensionamiento se realizará mediante el método espectral según el modo fundamental; y el cálculo de detalle se realizará mediante el método espectral multimodal. Ambas metodologías son válidas desde el punto de vista del cumplimiento de los requisitos definidos en los apartados 7.5.3 y 7.5.4 de UNE-EN 1998-2:

- Falla sísmica activa más próxima a más de 10 km. Esta información puede consultarse en el mapa del IGME de fallas de España [24].
- Suelo del emplazamiento tipo C, según la clasificación de UNE-EN 1998 (ver apartado 4.1 de esta guía).
- Amortiguamiento eficaz del sistema $\xi_{eff} = 5\% < 30\%$ (ver apartado 5.4 de esta guía).

El método espectral según el modo fundamental se puede emplear siempre como aproximación y pre-dimensionado, pero para aplicarlo como método de verificación definitivo, además de las tres condiciones anteriores, el tablero debe poder considerarse como un elemento rígido en un plano horizontal (apartado 7.5.4(1) de UNE-EN 1998-2), tal y como se explica en el apartado siguiente.

6.1 Método espectral basado en el modo fundamental

En este método, la deformación del tablero en un plano horizontal se asume despreciable en comparación con el desplazamiento horizontal de las cabezas de las pilas, y se considera que el tablero se desplaza horizontalmente como un sólido rígido en la dirección de la acción sísmica analizada, es decir, como un sistema de un grado de libertad (1 *gdl*). Según UNE-EN 1998-2 (4.2.2.3) esta asunción es siempre aceptable en la dirección longitudinal cuando se trata de puentes rectos con tablero continuo como es el caso de este ejemplo. En la dirección transversal, la consideración anterior es aceptable cuando el cociente entre dimensiones longitudinal (L) y transversal (B) del puente es inferior a 4; o cuando el cociente entre la diferencia máxima de desplazamientos de cabezas de pilas, Δ_d , y la media, d_a , de los desplazamientos

de todas las cabezas de las pilas en la dirección transversal bajo una distribución de fuerzas transversales similar a las sísmicas no rebasa 0,20. En el puente de este ejemplo, la primera condición ($L/B \leq 4$) no se cumple, pero la segunda ($\Delta_d/d_a \leq 0,2$) se cumple casi trivialmente porque el puente es prácticamente simétrico en alzado (la diferencia de altura de 30 cm entre pilas da lugar a un valor $\Delta_d/d_a = 0,08 < 0,2$). En cualquier caso, esta condición puede tener que verificarse una vez dimensionados los aisladores, ya que la utilización de diferentes aisladores en distintas pilas dará lugar a un valor de Δ_d/d_a distinto.

Independientemente de que se utilice el método espectral del modo fundamental o el espectral multimodal, la respuesta obtenida con el método del modo fundamental es necesario siempre calcularla para establecer un límite inferior (apartado 7.5.5 de UNE-EN 1998-2) del desplazamiento y fuerza cortante obtenidos con el método espectral multimodal que se explica más adelante, pero a los efectos de calcular este límite inferior no es necesario que se cumpla $L/B \leq 4$ o $\Delta_d/d_a \leq 0,2$.

La figura 17 muestra el sistema de 1 *gdl* con el que se idealiza el puente en la dirección longitudinal, así como el cálculo de la rigidez horizontal efectiva del sistema, K_{eff} , que se obtiene como suma, ya que trabajan en paralelo, de las rigideces laterales de los aisladores de los estribos y de las rigideces laterales de los apoyos centrales. Los apoyos centrales combinan en serie la rigidez lateral del aislador y la de la pila. Nótese que la rigidez de los estribos, K_E , se ha considerado muy grande en comparación con la de sus aisladores, $K_{b,E}$, por lo que la rigidez de los aisladores es la que domina ($1/K_E + 1/(2K_{b,E}) \approx 1/(2K_{b,E})$). Asimismo, en el cálculo de la rigidez de los apoyos centrales (pilas, K_{P1} y K_{P2} , y sus aisladores, $K_{b,P}$) se ha ignorado el desplazamiento horizontal y la rotación de la cimentación a las que se refiere el apartado 7.5.4(3) de UNE-EN 1998-2, por considerar que las rigideces correspondientes son muy elevadas en relación con K_{P1} , K_{P2} y $K_{b,P}$. En la figura 16, M indica la masa sísmica total considerada; a es la aceleración máxima absoluta de respuesta debido al sismo en el centro de masas del tablero, y d_{cd} el desplazamiento máximo respecto al suelo correspondiente.

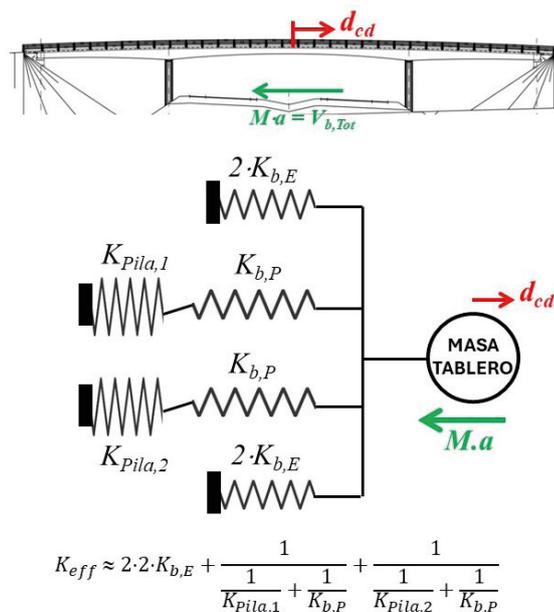


Figura 17 Esquema de rigidez del sistema de 1 *gdl* representativo modo fundamental

A efectos de esta guía, el método espectral basado en el modo fundamental se va a utilizar en el apartado 8 de esta guía para comprobar la viabilidad de utilizar como aisladores sísmicos los dimensionados como apoyos elastoméricos según UNE-EN 1337-3 frente a sollicitaciones no sísmicas en la *Guía para el cálculo de apoyos elastoméricos. Ejemplo de aplicación* [19]. También se utiliza el método basado en el modo fundamental en el apartado 9.1, para pre-dimensionar unos nuevos aisladores sísmicos que después se comprueban mediante el método multimodal en el apartado 9.4. A lo largo de la guía se podrá comprobar que, para puentes sencillos (uniforme en cuanto rigideces laterales de las pilas, número y luces de los vanos compensadas y proporcionadas, utilización de uno o dos tipos de aisladores, etc.), el método espectral en el modo fundamental suele ser suficientemente aproximado para la consideración de los sismos horizontales.

6.2 Método espectral multimodal

En este método se considera la deformación del tablero y de las pilas en sus diferentes modos de vibración. El puente en su conjunto se idealiza mediante un modelo numérico en tres dimensiones (3D) de múltiples grados de libertad (n *gdl*) y con un número de nodos suficientemente alto para que sea capaz de reproducir las deformaciones que se consideren relevantes en el tablero y en las pilas. En este modelo, para los modos de vibración de periodo superior a $0,8T_{eff}$, se deben emplear rigideces horizontales efectivas para cada aislador en las direcciones principales horizontales, $k_{eff,b,i,x}$ y $k_{eff,b,i,y}$, que se toman, en el caso general, iguales a las rigideces secantes correspondientes a los desplazamientos máximos entre las placas de extremo de los mismos, calculados en cada dirección principal horizontal mediante dos análisis independientes previos utilizando el método del modo fundamental. Así mismo, para determinar la respuesta modal máxima en los modos de vibración con periodos superiores a $0,8T_{eff}$ debe emplearse como amortiguamiento efectivo, ξ_{eff} , el menor de los dos valores obtenidos (uno en cada dirección principal horizontal X e Y) con la fórmula (7.5) de UNE-EN 1998-2, empleando el método espectral del modo fundamental aplicado de forma independiente en cada dirección principal horizontal. La respuesta máxima en los modos de vibración con periodos iguales o inferiores a $0,8T_{eff}$, debe obtenerse con el modelo 3D modelizando los aisladores con las rigideces elásticas $k_{b,i,x}$ y $k_{b,i,y}$, (no las rigideces efectivas secantes) y empleando la fracción de amortiguamiento inherente ξ_I correspondiente a una estructura sin aisladores (normalmente $\xi_I = 0,05$).

En el caso general de aisladores sísmicos que no sean de tipo LDRB (o HDRB), como por ejemplo los LRB o los aisladores de péndulo de fricción, el cálculo de las rigideces efectivas $k_{eff,b,i,x}$ y $k_{eff,b,i,y}$ y del amortiguamiento efectivo, ξ_{eff} , obliga a realizar iteraciones porque ambos dependen de los desplazamientos máximos relativos entre las placas de extremo del aislador en cada dirección principal horizontal. Es importante señalar que, en estos casos, el amortiguamiento efectivo, ξ_{eff} , y las rigideces efectivas horizontales de cada aislador i , $k_{eff,b,i,x}$ y $k_{eff,b,i,y}$, calculados con el método espectral del modo fundamental se emplean, sin modificación, en el modelo 3D con el que se obtiene la respuesta en los modos de vibración de periodo superior a $0,8T_{eff}$ con el método espectral multimodal. Es decir, en el método espectral multimodal no hay que hacer iteraciones para obtener la respuesta en los modos de vibración de periodo superior a $0,8T_{eff}$, las iteraciones se realizan únicamente en los análisis previos con el método espectral del modo fundamental. En el método espectral multimodal tampoco hay que hacer iteraciones para obtener la respuesta máxima en los modos de vibración con periodos iguales o inferiores a $0,8T_{eff}$ porque en estos modos se emplean las rigideces elásticas de los

aisladores y el amortiguamiento inherente. Como periodo T_{eff} debe emplearse el mayor de los obtenidos en las direcciones principales horizontales X e Y mediante el método espectral del modo fundamental.

En el caso general de aisladores sísmicos que no sean de tipo LDRB, el cálculo de esta rigidez efectiva obliga a realizar iteraciones porque depende del desplazamiento máximo relativo entre las placas de extremo del aislador. En el caso particular de aisladores de tipo LDRB y en aras de la simplicidad, la norma UNE-EN 1998-2 (artículo 7.5.2.3.3) permite que se emplee como rigidez horizontal de los aisladores la rigidez elástica inicial asumiendo que no varía con el desplazamiento, lo cual evita tener que iterar. El motivo es que los aisladores de bajo nivel de amortiguamiento exhiben unos ciclos de deformación muy esbeltos que son próximos a una recta.

Entre los efectos que permiten capturar el análisis multimodal respecto del modal de modo fundamental, destacan:

- Mayor precisión en los desplazamientos, giros y reacciones.
- Permite tener en cuenta la contribución de los modos altos de vibración.
- Permite analizar con facilidad el comportamiento de los aisladores frente al sismo vertical.
- Se capturan los giros en aisladores frente a sismos horizontales por compatibilidad con la rotación de la cabeza de las pilas por su deformación en ménsula que, frente a la acción sísmica, puede ser relevante.

Según se indica en el apartado 7.5.2.4 de UNE-EN 1998-2, si mediante el método del modo fundamental se demuestra que los desplazamientos sísmicos de cálculo respecto del suelo medidos en el centro de rigidez del tablero, d_{cd} , utilizando las propiedades UBDP y LBDP, difieren en menos de $\pm 15\%$ respecto del obtenido con las propiedades nominales, el cálculo multimodal podría realizarse únicamente con propiedades nominales (DP).

La figura 18 muestra el modelo 3D del puente analizado en este ejemplo y que se utiliza en el apartado 9.4 de esta guía. En el modelo numérico, se representan los aisladores como muelles con las propiedades de rigidez del aislador según se definen en el apartado 5.4 de esta guía.



Figura 18 Modelo numérico para el análisis multimodal

A efectos de esta guía, el método espectral multimodal se utiliza en el apartado 9.4 para comprobar unos nuevos aisladores sísmicos, previamente pre-dimensionados mediante el método del modo fundamental en el apartado 9.1.

7

RESUMEN DE COMPROBACIÓN DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO EN ESTADO LÍMITE ÚLTIMO SEGÚN UNE-EN 15129 Y UNE-EN 1998-2

Se incluye en este apartado un resumen de las comprobaciones que hay que realizar a los apoyos elastoméricos como aisladores sísmicos en ELU en situación sísmica para las diferentes combinaciones de acciones. No se incluyen las comprobaciones de los aisladores elastoméricos que se pueden considerar como "sencillos", (véase la definición en apartados 7.2 y 7.5.2.3.3(5) de UNE-EN 1998-2) y quedar así eximidos del cumplimiento de la norma UNE-EN 15129. Se incluyen únicamente las comprobaciones correspondientes a los aisladores elastoméricos que cumplen las normas UNE-EN 15129 y UNE-EN 1998-2. No se incluyen las comprobaciones del resto de elementos del sistema de aislamiento, como los anclajes y otros elementos resistentes del mismo. Tampoco se incluyen las comprobaciones de UNE-EN 1337-3 como apoyos elastoméricos en situaciones no sísmicas, que aparecen desarrolladas en la *Guía para el cálculo de apoyos elastoméricos* [18] y su guía complementaria de ejemplo [19]. Puede contemplarse un desarrollo más completo y teórico de todas las comprobaciones en la *Guía para el cálculo de aisladores elastoméricos de bajo amortiguamiento en zona sísmica* [20].

Entre las condiciones que exige UNE-EN 1998-2 en apartado 7.5.2.1(1) cuando los LDRB no satisfacen los requisitos para poder ser considerados "sencillos" está el cumplimiento de la norma UNE-EN 15127, que cuando entró en vigor UNE-EN 1998-2 todavía estaba en fase de elaboración y sólo existía como pre-norma prEN 15129. Por otra parte, en el apartado 7.6.2(5) y otros de UNE-EN 1998-2 se remite a la norma UNE-EN 1337-3 que deben cumplir los LDRB frente a las situaciones no sísmicas por el hecho de ser apoyos elastoméricos. Esta norma obliga, entre otras cosas, a que la deformación tangencial máxima, $\varepsilon_{q,d}$, calculada en situaciones no sísmicas (y por lo tanto sin incluir acciones sísmicas y con las acciones no sísmicas desfavorables mayoradas) según el apartado 5.3.3.3 de UNE-EN 1337-3, sea menor que 1. Es importante señalar que la $\varepsilon_{q,d}$ que define UNE-EN 1998-2 en su apartado 7.6.2 con las deformaciones por sismo, se calcula de forma distinta a la de la norma UNE-EN 1337-3. La primera se obtiene para los desplazamientos en cada dirección principal, sin componer vectorialmente el desplazamiento en la dirección horizontal X y en Y . Por el contrario, $\varepsilon_{q,d}$ de UNE-EN 1337-3

se calcula con el desplazamiento obtenido sumando vectorialmente los desplazamientos en X y en Y . Debe recordarse que UNE-EN 1337-3 y UNE-EN 15129 son normas de producto cuyo objeto principal es establecer los requisitos que debe cumplir el dispositivo para cumplir los estándares europeos y poder ser empleado como apoyo elastomérico en situaciones no sísmicas (UNE-EN 1337-3), o como aislador sísmico (UNE-EN 15129) en situaciones sísmicas. Por el contrario, la norma UNE-EN 1998-2 es una norma de proyecto que tiene prioridad sobre las normas de producto y en la que se establecen condiciones y comprobaciones que hay que realizar en el sistema de aislamiento, en la subestructura y en la superestructura, para garantizar que el puente tiene el nivel de seguridad adecuado frente a sismo. No obstante, las normas UNE-EN 1337-3 y UNE-EN 15129 incluyen condiciones que pueden considerarse como verificaciones de proyecto, y a las que remite la norma UNE-EN 1998-2. Por ejemplo, el apartado 8.2.3.4.2 de UNE-EN 15129 establece una verificación sobre deformación tangencial total, $\varepsilon_{t,d}$, que deben cumplir los LDRB no "sencillos", y a la que remite UNE-EN 1998-2 en el apartado 7.5.2.1(1) cuando establece que los aisladores sísmicos (salvo los LDRB "sencillos") deberán cumplir la norma UNE-EN 15129. Un segundo ejemplo son las verificaciones de estabilidad del apartado 5.3.3.6 de UNE-EN 1337-3 pensadas para situaciones no sísmicas y que la norma UNE-EN 1998-2 extiende y hace obligatorias en situaciones sísmicas para los LDRB "sencillos" en apartado 7.6.2(5). Un tercer ejemplo son las verificaciones de estabilidad de los apartados 8.2.3.4.4 o 8.2.3.4.5 (si la sujeción es mediante un rebaje) de UNE-EN 15129 que la norma UNE-EN 1998-2 hace obligatorias en el apartado 7.5.2(1) para los LDRB no "sencillos".

7.1 Desplazamiento horizontal máximo total d_{max}

Según el apartado 7.6.2(3) de UNE-EN 1998-2, los aisladores sísmicos deben poder deformarse sin cambios significativos de sus propiedades hasta un desplazamiento d_{max} dado por la expresión (2). Nótese que el efecto de las combinaciones de acciones que se está considerando son los desplazamientos d_{max} , y que la norma define d_{max} como los desplazamientos en cada dirección principal, y que llamaremos en adelante $d_{max,x}$ en la dirección principal X y $d_{max,y}$ en la dirección principal Y . Por lo tanto, la comprobación hay que hacerla independientemente y por separado en cada dirección principal. Por otra parte, la contribución del desplazamiento del aislador debido a las acciones sísmicas, d_{bd} , en cada dirección principal (denominadas $d_{bd,x}$ y $d_{bd,y}$ en esta guía) que interviene en el cálculo de d_{max} en esa misma dirección principal según la expresión (2), es la suma de la proyección en esa dirección del desplazamiento provocado por una de las tres componentes de la acción sísmica y del 30 % del desplazamiento debido a las otras dos componentes en aplicación de la regla de combinación de las componentes de la acción sísmica del apartado 4.3.3.5.2(4) de UNE-EN 1998-2. Para cada una de las cuatro hipótesis seleccionadas para calcular los desplazamientos (I, II, III y IV), tanto en los aisladores de estribos (apartado 4.3.2 de esta guía) como en las de pilas (apartado 4.3.3 de esta guía), se obtendrán dos valores de d_{max} , uno en cada dirección principal horizontal, $d_{max,x}$ y $d_{max,y}$. Obviamente todos los términos que componen la expresión (2) para obtener d_{max} , es decir, d_{bd} , d_G (d_{CP} , d_P , d_{∞} , d_T), también se miden en cada dirección principal. Dicho de otra forma, para obtener $d_{max,x}$ se emplea $d_{bd,x}$ y el desplazamiento provocado por las acciones no sísmicas en situación sísmica en la dirección principal X que se denominan $d_{G,x}$ en esta guía; análogamente, para obtener $d_{max,y}$ se emplea $d_{bd,y}$ y el desplazamiento provocado por las acciones no sísmicas en situación sísmica en la dirección principal Y llamada $d_{G,y}$ en esta guía.

Comentario: el criterio de verificar los aisladores con un valor de d_{max} ($= d_{Ed}$) en cada dirección principal, y no con la resultante vectorial de combinar ambas direcciones (a semejanza de cómo se hace para las combinaciones no sísmicas en UNE-EN 1337-3, o de cómo se indica en el apartado 7.6.2(6) de UNE-EN 1998-2 en aisladores elastoméricos "sencillos", obteniendo $v_{xy,d}$) lo establece explícita y claramente tanto UNE-EN 1998-2, en su apartado 7.6.2(3), como UNE-EN 15129, en su apartado 3.1.6. Este criterio de emplear el desplazamiento máximo en cada dirección principal se ha adoptado también en la 2.ª generación del Eurocódigo 8 y es coherente con la definición del amortiguamiento efectivo, del periodo efectivo o de la rigidez efectiva que son siempre en una determinada dirección principal. Por otra parte, en el caso de cargas dinámicas y a diferencia de las estáticas, estimar el desplazamiento máximo horizontal en la dirección de máximo desplazamiento como suma vectorial de los desplazamientos máximos en dos direcciones principales horizontales ortogonales obtenidos independientemente para la acción sísmica actuando en cada una de ellas de forma independiente, implicaría suponer que los máximos en X y en Y se dan en el mismo instante de tiempo, y es bien sabido [26] que ello conduce a una sobreestimación excesivamente conservadora. Debe señalarse también que el cálculo del módulo del vector resultante de sumar vectorialmente dos vectores (por ejemplo, de desplazamiento) en direcciones ortogonales no tiene ninguna relación con la regla de la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados (SRSS) que establece UNE-EN 1998 para combinar los efectos (siempre en la misma dirección) de las diferentes componentes de la acción sísmica.

En la referencia [25], cuyos autores tuvieron una contribución muy significativa en el Eurocódigo 8 de 1.ª generación, se aborda el criterio adoptado por el Eurocódigo 8 de realizar la comprobación de los desplazamientos de los aisladores en la dirección principal. En dicha publicación [25], se realiza un análisis comparativo de la respuesta de un puente aislado mediante péndulos de fricción obtenida por el método del modo fundamental según las direcciones principales (X , Y) y mediante un análisis dinámico en el dominio del tiempo con siete acelerogramas, cada uno con tres componentes (en X , Y y Z) aplicadas simultáneamente. Se compara el desplazamiento que predice el método del modo fundamental en las direcciones principales horizontales X e Y debido únicamente a las acciones sísmicas ($d_{bd,x} = d_{bd,y} = 220$ mm), con el máximo desplazamiento obtenido del análisis dinámico directo tanto en las direcciones principales como en la dirección de máximo desplazamiento. No está claro en la publicación [25] si los desplazamientos horizontales que se dan como resultado de los análisis en el dominio del tiempo son debidos sólo a las acciones sísmicas o incluyen también otras distintas como las gravitatorias, porque la tabla 8.17 de [25] los denomina d_{Ed} (que sería el desplazamiento total máximo incluyendo acciones no sísmicas en situación sísmica según la definición de UNE-EN 15129) y el texto del apartado 8.4.11.3 de [25] los llama d_{cd} (que es el desplazamiento horizontal debido sólo al sismo en el centro de torsión del tablero según UNE-EN 1998-2). Como caso más desfavorable para la discusión que sigue se ha supuesto que los desplazamientos horizontales que da [25] como resultado de los cálculos dinámicos directos son debidos sólo a cargas sísmicas y sus valores son $d_{bd,x} = 193$ mm y $d_{bd,y} = 207$ mm en las dos direcciones principales horizontales, y $d_{bd,Tot.} = 255$ mm en la dirección de desplazamiento máximo. Nótese que como el desplazamiento máximo en las direcciones principales X o Y ($d_{bd,x}$ o $d_{bd,y}$) no se produce en general en el mismo instante de tiempo, el desplazamiento máximo en la dirección de máximo desplazamiento que da el análisis en el

tiempo ($d_{bd,Tot} = 255$ mm) no coincide con el que se obtendría sumando vectorialmente $d_{bd,x}$ y $d_{bd,y}$ ($= (1.932 + 2.072) 0,5 = 283$ mm). El desplazamiento máximo que predice el método del modo fundamental en cada dirección principal (220 mm) considerando sólo una componente del sismo es un 14 % y un 6 % superior al que se obtiene con el análisis dinámico directo en cada dirección principal (193 mm y 207 mm) considerando las dos componentes actuando simultáneamente. En cambio, el desplazamiento máximo en las direcciones principales que predice el método del modo fundamental es un 16 % inferior al desplazamiento máximo en la dirección de máximo desplazamiento obtenido del cálculo en el dominio del tiempo (255 mm). Estas dos magnitudes no son sin embargo comparables ya que se dan en direcciones diferentes, y por otra parte era de esperar ya que el método del modo fundamental está considerando sólo una componente horizontal del sismo y en el análisis en el dominio del tiempo se consideran tres componentes (dos horizontales y una vertical) actuando simultáneamente. Los autores de la referencia [25] plantean en su estudio dos opciones para estimar de forma aproximada el desplazamiento máximo en la dirección de máximo desplazamiento considerando la actuación simultánea de las dos componentes horizontales del sismo, a partir los desplazamientos máximos en las direcciones principales obtenidos con el método del modo fundamental considerando la acción sísmica aplicada sólo en una dirección principal:

- Opción 1: incrementar las ordenadas del espectro elástico de cálculo por un factor de 1,25-1,30. En el ejemplo de la publicación [25], aplicando un factor de 1,25, supondría obtener $d_{bd} = 275$ mm según el método del modo fundamental. Parece un criterio demasiado conservador.
- Opción 2: incrementar los desplazamientos obtenido en la dirección principal más crítica según el método del modo fundamental, por un factor 1,15-1,25. En el ejemplo de la publicación [25], aplicando un factor de 1,15, se obtiene $d_{bd} = 253$ m, que es muy cercano al obtenido mediante el cálculo dinámico directo.

Ninguna de estas dos opciones esta recogida ni en la primera ni en la segunda generación del Eurocódigo 8. Nótese que lo que buscan estas opciones es estimar el desplazamiento máximo en la dirección de máximo desplazamiento a partir del desplazamiento máximo calculado en la dirección principal con el método del modo fundamental sin tener que aplicar la regla general de combinación de los efectos de las componentes de la acción sísmica del artículo 4.3.3.5.2(4) de UNE-EN 1998-1. Si se desea estimar el desplazamiento máximo en la dirección de máximo desplazamiento, $d_{max,Tot}$, considerando las dos componentes horizontales del sismo y siguiendo el Eurocódigo 8, lo que debe hacerse es aplicar la regla de combinación de los efectos de la acción sísmica del artículo 4.3.3.5.2(4) de UNE-EN 1998-1, siguiendo los siguientes pasos: 1) se calculan los desplazamiento máximos en las direcciones principales X e Y para el sismo actuando en la dirección principal X que expresaremos con el vector $d_{max,X} = [d_{max,X,x}, d_{max,X,y}]$; 2) se calculan los desplazamientos máximos en las direcciones principales X e Y para el sismo actuando en la dirección principal Y que expresaremos con el vector $d_{max,Y} = [d_{max,Y,x}, d_{max,Y,y}]$; 3) se combinan los desplazamientos en las dos direcciones principales mediante la expresión $d_{max,X} + 0,3 d_{max,Y} = [d_{max,X,x} + 0,3 d_{max,Y,x}, d_{max,X,y} + 0,3 d_{max,Y,y}] = [d_{max,x}, d_{max,y}]_{(x)}$ y se calcula el módulo del vector resultante $d_{max,Tot(x)} = |d_{max,x}, d_{max,y}|_{(x)} = [(d_{max,X,x} + 0,3 d_{max,Y,x})^2 + (d_{max,X,y} + 0,3 d_{max,Y,y})^2]^{0,5}$; 4) se combinan los desplazamientos en las dos direcciones

principales mediante $0,3 d_{max,X} + d_{max,Y} = [0,3 d_{max,X,x} + d_{max,Y,x}, 0,3 d_{max,X,y} + d_{max,Y,y}] = [d_{max,x}, d_{max,y}]_{(y)}$ y se obtiene el módulo del vector resultante: $d_{max,Tot(y)} = |d_{max,x}, d_{max,y}|_{(y)} = [(0,3 d_{max,X,x} + d_{max,Y,x})^2 + (0,3 d_{max,X,y} + d_{max,Y,y})^2]^{0.5}$. Estos cálculos deben realizarse para los vectores $d_{max,X}$ y $d_{max,Y}$ con signo positivo y con signo negativo, y tomar como desplazamiento máximo en la dirección de máximo desplazamiento el módulo de mayor valor $d_{max,Tot} = \max\{d_{max,Tot(x)}; d_{max,Tot(y)}; d_{max,Tot(-x)}; d_{max,Tot(-y)}\}$. Este procedimiento del Eurocódigo 8 aplicado al puente aislado estudiado en la referencia [25] predice un desplazamiento máximo en la dirección de máximo desplazamiento de 230 mm que es aproximadamente un 10 % inferior al obtenido con el análisis en el dominio del tiempo. Esta desviación del 10 % es muy próxima al margen de infraestimación que tiene la regla aplicada [26], y está muy por debajo de las diferencias (en torno al 20 %) entre resultados obtenidos con métodos simplificados y análisis en dominio del tiempo que se admiten en cálculos sísmicos teniendo en cuenta la variabilidad e incertidumbres asociadas a la acción sísmica. La propia selección de acelerogramas para el análisis en el dominio del tiempo y la forma de escalarlos puede conducir a variaciones en las respuestas máximas notablemente superiores al 10 %.

El desplazamiento máximo en la dirección de máximo desplazamiento se usa, por ejemplo, para comprobar que el tablero no impactará sobre los estribos en el caso general de un puente con torsiones de eje vertical. Aunque ni UNE-EN 15129 ni UNE-EN 1998-2 limiten el desplazamiento máximo en la dirección de máximo desplazamiento, $d_{max,Tot}$, el requisito no cuantificado del apartado 7.6.2.(3)P de UNE-EN 1998-2, que exige que los aisladores (como parte del sistema de aislamiento) puedan funcionar sin cambios significativos de sus propiedades hasta desplazamientos máximos en las direcciones principales de valor d_{max} , aconseja que en el caso de aisladores con la misma capacidad de desplazamiento lateral en todas las direcciones se compruebe que el desplazamiento máximo del aislador en la dirección de máximo desplazamiento calculada como se expone en este apartado no supere su capacidad de deformación lateral, lo cual es un criterio compartido por las conclusiones de [25], y se plantea como recomendación en esta guía. Es decir, que las comprobaciones de los aisladores resumidas en el apartado 7 se realicen para el $d_{max,Tot}$. Calculando este con la regla general de combinación de los efectos de las componentes de la acción sísmica del artículo 4.3.3.5.2(4) de UNE-EN 1998-1, como límite inferior, o bien con las opciones 1 o 2 de [25] si se desea ser más conservador.

Es importante comentar que el criterio que establece UNE-EN 1998-2 en el apartado 7.6.2(6) para poder considerar un aislador LDRB como "sencillo" emplea un desplazamiento máximo que la norma denomina con otro nombre, $v_{xy,d}$, y que la norma explícitamente indica que se calcula de forma distinta a d_{max} . Concretamente, a diferencia de d_{max} , que se mide en una dirección principal horizontal (X o Y), $v_{xy,d}$ hay que obtenerlo sumando vectorialmente los desplazamientos máximos en cada dirección principal, $v_{x,d}$ y $v_{y,d}$ obtenidos mediante la

expresión (2), donde según el apartado 7.6.2(2)P de UNE-EN 1998-2, $v_{x,d}$ hay que calcularlo como $v_{x,d} = \gamma_x \cdot d_{bd,x} + d_{G,x}$ y $v_{y,d} = \gamma_x \cdot d_{bd,y} + d_{G,y}$, es decir:

$$v_{xy,d} = \sqrt{v_{x,d}^2 + v_{y,d}^2} = \sqrt{(\gamma_x d_{bd,x} + d_{G,x})^2 + (\gamma_x d_{bd,y} + d_{G,y})^2} = \sqrt{d_{max,x}^2 + d_{max,y}^2} \quad (37)$$

Comentario: este criterio de desplazamiento de cálculo $v_{xy,d}$ en aisladores LDRB “sencillos” penaliza el dimensionamiento de los mismos. En cargas de tipo dinámico, es de esperar que el desplazamiento horizontal que da la expresión (37) sea en general bastante superior al desplazamiento máximo en la dirección de máximo desplazamiento cuando actúan todas las componentes del sismo simultáneamente, debido a que los máximos en cada dirección principal no se producen en el mismo instante del tiempo [26], como ya se ha expuesto anteriormente. Lo que se consigue con la expresión (37) es exigir a los aisladores LDRB que se ajusten a UNE-EN 1337-3 una mayor capacidad de desplazamiento horizontal ($v_{xy,d}$ puede llegar a ser hasta 1,4 mayor que d_{max}) para compensar que las verificaciones de cálculo y los ensayos son menos exigentes.

La norma UNE-EN 1998-2 emplea la expresión (37) únicamente para determinar si un apoyo elastomérico que cumpla sólo UNE-EN 1337-3 (y no UNE-EN 15129) puede emplearse como aislador sísmico “sencillo”. El valor del límite de la deformación tangencial que establece UNE-EN 1998-2 en el apartado 7.6.2(6) está pensado para ser calculado de la forma indicada en la expresión (37) y no de ninguna otra forma. UNE-EN 1998-2 no indica en ningún momento que la expresión (37) pretenda predecir el desplazamiento máximo en cualquier dirección principal para comprobar, por ejemplo, posibles choques del tablero del puente contra los estribos. La norma UNE-EN 1998-2 adoptó la expresión (37) únicamente como criterio para establecer si un apoyo elastomérico que cumple UNE-EN 1337-3 se puede emplear como aislador sísmico “sencillo”, muy posiblemente para seguir el mismo criterio empleado por UNE-EN 1337-3 para cargas estáticas, para las cuales la expresión (37) tiene pleno sentido ya que no varían en el tiempo.

Es importante señalar de nuevo que la expresión (37) no tiene nada que ver con la regla SRSS de combinación de los efectos de las componentes de la acción sísmica del artículo 4.3.3.5.2(4) de UNE-EN 1998-1. La regla SRSS no se puede aplicar a efectos de las acciones en diferentes direcciones [26]. La regla SRSS se aplica a los efectos de las acciones en una misma dirección provocadas por componentes del sismo en diferentes direcciones.

7.2 Deformación tangencial máxima de cálculo en situación sísmica, $\varepsilon_{t,d}$

La deformación tangencial total $\varepsilon_{t,d}$ obtenida como suma de la deformación tangencial, $\varepsilon_{c,El}$, debida al axil de compresión vertical máximo, $N_{Ed,max}$, de la deformación tangencial, $\varepsilon_{q,max}$, debida a la deformación horizontal total máxima, d_{max} , y de la deformación tangencial debida a la rotación angular, $\varepsilon_{\alpha,d}$, debe ser menor que una deformación última $\varepsilon_{t,u} = 7/\gamma_m$. Concretamente, $\varepsilon_{t,d}$ se obtiene con la siguiente expresión, según el apartado 8.2.3.4.2 de UNE-EN 15129:

$$\varepsilon_{t,d} = K_L (\varepsilon_{c,E_i} + \varepsilon_{q,max} + \varepsilon_{\alpha,d}) \leq \frac{7,0}{\gamma_m}$$

$$\varepsilon_{t,d} = 1,0 \left\{ \frac{6 \cdot S \cdot N_{Ed,max}}{A_r E_{I,c}} + \frac{d_{max}}{T_q} + \frac{(a'^2 \cdot \alpha_{a,d} + b'^2 \cdot \alpha_{b,d}) t_i}{2 \sum t_i^3} \right\} \leq \frac{7,0}{\gamma_m} \quad (38)$$

Adicionalmente, debe limitarse la deformación tangencial debida al desplazamiento lateral. Esta verificación, incluida en el apartado 8.2.3.3.3 de UNE-EN 15129, suele ser un criterio clave de dimensionamiento y, por tanto, punto de partida del pre-dimensionamiento.

$$\varepsilon_{q,max} = \frac{d_{max}}{T_q} \leq \begin{cases} 2,5 & \text{(si no se considera sometido a "acciones sísmicas pequeñas")} \\ 2,0 & \text{(si se considera sometido a "acciones sísmicas pequeñas")} \end{cases} \quad (39)$$

donde:

- K_L factor del tipo de carga definido en el anexo C de UNE-EN 1337-3. $K_L = 1,0$, salvo que, por requerimiento del proyectista, se decida adoptar 1,5 para sobrecargas de uso y 1,0 para el resto de los efectos
- $N_{Ed,max}$ es la carga vertical máxima de cálculo en combinación sísmica según la expresión (1), en kN
- S es el factor de forma de una capa individual de elastómero (ver apartado 5.1.3 de esta guía)
- A_r es el área en planta efectiva reducida debido a los efectos de carga de las combinaciones de cálculo no sísmicas (tanto deformaciones impuestas como fuerzas horizontales) (ver apartado 5.1.2 de esta guía), en m²
- $E_{I,c}$ es el módulo de compresión suponiendo el material elastómero incompresible bajo presión uniforme en toda su superficie, de una capa de elastómero (ver apartado 5.3 de esta guía), en kN/m²
- d_{max} es el desplazamiento horizontal máximo de cada aislador (igual a d_{Ed} en puentes) según la expresión (2) (ver apartados 4.3.1 y 7.1. de esta guía)
- T_q es el espesor total de elastómero activo que deforma a cortante, en m
- $\alpha_{a,d}$ es el ángulo de rotación sobre un eje paralelo a la dimensión a del apoyo, en la combinación sísmica según la expresión (1) ($\alpha_{a,d} \geq 0,003$ rad), en rad
- $\alpha_{b,d}$ es el ángulo de rotación sobre un eje paralelo a la dimensión b del apoyo, en la combinación sísmica según la expresión (1) ($\alpha_{a,d} \geq 0,003$ rad), en rad
- t_i es el espesor de una capa individual de elastómero, en m

$\sum t_i^3$ es el número de capas de material elastómero, n , por el espesor de cada capa elevado al cubo ($\sum t_i^3 = n \cdot t_i^3$)

γ_m es el coeficiente parcial relativo al material elastomérico. La norma UNE-EN 15129 recomienda adoptar $\gamma_m = 1,0$

Cuando se consideren aisladores elastoméricos "sencillos" según el apartado 7.6.2 de UNE-EN 1998-2, se deben realizar las verificaciones de deformaciones de la norma UNE-EN 1337-3 (ver [18] y [19]), aplicadas a la combinación sísmica según la expresión (1).

7.3 Deformación de tracción máxima y no levantamiento

Los aisladores no deben levantarse bajo la acción de las fuerzas verticales. Cuando el sistema de fijación del aislador permite tracciones en el elastómero, el apartado 8.2.1.2.7 de UNE-EN 15129 permite que la reacción axil mínima, $N_{Ed,min}$, sea de tracción siempre que las tensiones que generen no superen el valor de $2G$, donde G es el módulo de elasticidad transversal del elastómero para una deformación tangencial del 100 % en ensayo cíclico según el apartado 8.2.2.1.3.2 de UNE-EN 15129, es decir, el dinámico.

7.4 Estabilidad a pandeo o flexión lateral bajo acciones sísmicas

El aislador debe ser estable frente al pandeo cuando está sometido a carga lateral. Para asegurarlo, la norma UNE-EN 15129, en su apartado 8.2.3.3.4, emplea la ratio entre el axil vertical máximo obtenido en situación sísmica $N_{Ed,max}$ y la carga crítica de pandeo para desplazamiento horizontal sísmico nulo, P_{cr} . Esta ratio $N_{Ed,max}/P_{cr}$ no debe ser mayor que 0,5 en ningún caso, y debe cumplirse que el desplazamiento máximo normalizado definido como δ/a' , donde a' es la dimensión más pequeña de las placas de zunchado, no supere el valor cuando $(N_{Ed,max}/P_{cr})$ está entre 0,25 y 0,5, o el valor de 0,7 si $(N_{Ed,max}/P_{cr})$ es menor de 0,25. La carga crítica de pandeo para desplazamiento horizontal sísmico nulo, P_{cr} se calcula con la siguiente expresión tomada de J. M. Kelly [15]:

$$P_{cr} = \frac{\lambda \cdot G \cdot A_r \cdot a' \cdot S}{T_q} \quad (40)$$

donde:

G valor nominal del módulo de elasticidad transversal (ver el apartado 5.2.1 de esta guía), en kN/m²

- a' es el ancho (menor) efectivo en aisladores rectangulares, o el diámetro efectivo (D') en aisladores circulares, según apartado el 5.1.2 de esta guía, en m
- λ es igual a 1,3 en aisladores rectangulares y 1,1 en circulares
- A_r es el área efectiva reducida, según el apartado 5.1.2 de esta guía, en m²

7.5 Estabilidad de rodamiento bajo acciones sísmicas

Esta comprobación, incluida en el apartado 8.2.3.4.5 de UNE-EN 15129, es únicamente de aplicación cuando el sistema de fijación de los aisladores elastoméricos a la superestructura y a la subestructura es tal que los aisladores no pueden transmitir fuerzas verticales de tracción, es decir, los que se definen como no normalizados en el apartado 8.2.3.2 de UNE-EN 15129: aisladores fijados mediante rebajes en las placas de anclaje o con llaves de cortante (puede encontrarse un mayor desarrollo de los tipos de fijaciones en el apartado 4.2 de la *Guía para el cálculo de apoyos elastoméricos* de la Dirección General de Carreteras [18]).

Esta verificación busca garantizar que el aislador sea estable frente al rodamiento, para lo cual el desplazamiento horizontal máximo, d_{max} , no debe superar un determinado valor que depende de $N_{Ed,min}$, y que viene dado por:

$$d_{max} \leq \frac{1}{\gamma_R} \frac{N_{Ed,min} \cdot a'}{(K_b T_b + N_{Ed,min})} \quad (41)$$

donde:

- $N_{Ed,min}$ es la fuerza vertical mínima en la situación sísmica de cálculo, en kN
- K_b es la rigidez horizontal efectiva a cortante medida para el máximo desplazamiento en los ensayos (expresión (34))
- T_b es la altura total del dispositivo (chapas y elastómero), en m
- γ_R es un factor parcial cuyo valor recomendado es 1,5
- a' es el ancho (menor) efectivo en aisladores rectangulares, o el diámetro efectivo (D') en aisladores circulares, según apartado el 5.1.2 de esta guía, en m

La comprobación involucra el cálculo de la ratio entre dos magnitudes con unidades de fuerza: el axil vertical mínimo en situación sísmica $N_{Ed,min}$ y la fuerza $(K_b T_b + N_{Ed,min})$.

7.6 Espesor mínimo de las placas de zunchado de acero

El apartado 8.2.3.4.3 de UNE-EN 15129 remite directamente al apartado 5.3.3.5 de UNE-EN 1337-3 para el cálculo de las placas de zunchado. En él se indica que el espesor mínimo de las placas de zunchado de acero debe ser determinado mediante la siguiente expresión:

$$t_s = \frac{K_p \cdot F_{z,d} \cdot (t_1 + t_2) \cdot K_h \cdot \gamma_m}{A_r \cdot f_y} \geq 2 \text{ mm} \quad (42)$$

donde:

$F_{z,d}$ es la fuerza vertical máxima en cualquier combinación de cálculo (incluida situación sísmica, $N_{Ed,max}$), en kN

A_r es el área efectiva reducida, según el apartado 5.1.2 de esta guía, en m²

K_p es un factor de corrección del esfuerzo y debe tomarse igual a 1.3

t_1 y t_2 corresponden al espesor de las capas de material elastómero a disponer a cada lado de la placa de zunchado acero, en mm

K_h es un factor para las tensiones de tracción inducidas en la placa y debe tomarse igual a 1,0 si la placa a dimensionar es una placa sin agujeros o con un sólo agujero central, o 2,0 si la placa a dimensionar es una placa con agujeros obturados o sin obturar

γ_m es el coeficiente parcial cuyo valor recomendado es 1,00

f_y es el límite elástico del acero, en kN/m²

8

COMPROBACIÓN SÍSMICA DE AISLADORES DIMENSIONADOS COMO APOYOS ELASTOMÉRICOS SEGÚN UNE-EN 1337-3

En este apartado, se van a comprobar frente a la combinación sísmica unos apoyos elastoméricos dimensionados para cumplir estrictamente con los criterios de UNE-EN 1337-3, y se va a determinar si se pueden utilizar como aisladores sísmicos del tipo elastomérico de bajo amortiguamiento (LDRB).

Cuando el dimensionado de los apoyos elastoméricos cumple únicamente los criterios de UNE-EN 1337-3 y el requisito de los apartados 7.6.2(6) y 7.6.2(2) de UNE-EN 1998-2, pero no cumple la norma UNE-EN 15129, puede tratarse como un LDRB "sencillo" a los efectos de aplicación de la norma UNE-EN 1998-2. Si el LDRB proyectado con UNE-EN 1337-3 cumple también los requisitos de los apartados 8.2.1.2.11, 8.2.1.2.2 (con las modificaciones que introduce 8.2.1.2.11), 8.2.1.2.4 (con las modificaciones que introduce 8.2.1.2.11), 8.2.1.2.7 (con las modificaciones que introduce 8.2.1.2.11), 8.2.3.4.2 y 8.2.3.4.4 o 8.2.3.4.5 (según si el sistema de fijación del aislador permita desarrollar fuerzas de tracción verticales o no) de UNE-EN 15129 pero no el resto, y la deformación tangencial cumple que $\varepsilon_{q,max} \leq 2$, puede tratarse como un LDRB sometido a "acciones sísmicas pequeñas" según UNE-EN 15129. Si el LDRB proyectado con UNE-EN 1337-3 cumple todos los requisitos de UNE-EN 15129 y la deformación tangencial cumple $\varepsilon_{q,max} \leq 2,5$, puede tratarse como un aislador LDRB no sometido a "acciones sísmicas pequeñas" (caso general), según UNE-EN 15129. Si $\varepsilon_{q,max} > 2,5$, o no cumpliera "acciones sísmicas pequeñas" cualquiera de las otras verificaciones resumidas en el apartado 7 de esta guía, entonces el dispositivo no sería válido para actuar como aislador en el puente del ejemplo.

En este ejemplo, se van a seguir los siguientes pasos:

1. Dimensionamiento de los apoyos elastoméricos aplicando únicamente UNE-EN 1337-3 (realizado en la *Guía para el cálculo de apoyos elastoméricos. Ejemplo de aplicación* [19]).

2. Determinación de los desplazamientos, fuerzas cortantes y área efectiva reducida A_r correspondientes a las acciones no sísmicas en situación sísmica.
3. Determinación de los desplazamientos y cortantes en apoyos debidos a la acción sísmica mediante el Método Espectral del Modo Fundamental. Con esta información se llevan a cabo las siguientes comprobaciones preliminares con las acciones sísmicas:
 - 3.1. En primer lugar, comprobar si los apoyos elastoméricos cumplen la condición de deformación tangencial $\varepsilon_{q,d} \leq 2$ para poder tratarlos como LDRB "sencillos" según el apartado 7.6.2(5) de UNE-EN 1998-2, en cuyo caso ya podrían tratarse como apoyos elastoméricos según UNE-EN 1337-3.
 - 3.2. Determinar si los apoyos elastoméricos cumplen las condiciones de desplazamiento máximo, $d_{bd} < d_G$, de fuerza cortante máxima, $V_{bd} < V_G$, y de deformación tangencial máxima, $\varepsilon_{q,max} \leq 2$, que establece UNE-EN 15129 para poder considerarlos como LDRB sometidos a "acciones sísmicas pequeñas" (apartado 4.3.4 de esta guía).
 - 3.3. Determinar si los apoyos elastoméricos cumplen la condición de deformación tangencial máxima $\varepsilon_{q,max} \leq 2,5$ que establece UNE-EN 15129 para poder considerarlos como LDRB no sometidos a "acciones sísmicas pequeñas".
4. En caso de que la comprobación 3.1 fuera favorable se procedería a la verificación completa de los apoyos elastoméricos únicamente con UNE-EN 1337-3. Si la comprobación 3.1 no es favorable, pero se cumplen las condiciones de 3.2 o 3.3, se procedería con la comprobación de los requisitos de UNE-EN 15129, resumidos en el apartado 7 de esta guía.
5. En caso de que las comprobaciones 3.1, 3.2 y 3.3 sean desfavorables, se redimensiona el aislador para garantizar el cumplimiento de los requisitos de UNE-EN 15129 y UNE-EN 1337-3.

8.1 Dimensionamiento de los aisladores elastoméricos según UNE-EN 1337-3

Se utilizarán como referencia de aisladores elastoméricos dimensionados estrictamente según UNE-EN 1337-3, los apoyos elastoméricos calculados en la *Guía para el cálculo de apoyos elastoméricos. Ejemplo de aplicación* [19]. En dicha guía se demuestra el cumplimiento de los requisitos de UNE-EN 1337-3 para los siguientes apoyos:

- Apoyos de estribos: apoyos rectangulares de 400 x 500 mm anclados a tracción y cortante en sus caras inferiores pero solo coaccionados a cortante en sus caras superiores (anclados al estribo y con llave de cortante contra el tablero). Sus características geométricas se corresponden con las de un apoyo tipo C, según la tabla 3 de UNE-EN 1337-3. Se trata, por tanto, de un apoyo elastomérico que se podría emplear, en principio, como LDRB de tipo "sencillo" porque cumpliría los requisitos de fijación del UNE-EN 1998-2, y también como LDRB (sometido a "acciones sísmicas pequeñas" o no) porque se ajusta al sistema de fijación normalizada según el apartado 8.2.3.2 de UNE-EN 15129. Sus propiedades son las siguientes y se muestran en la figura 19:

- Módulo de elasticidad transversal nominal: $G_g = 0,9 \text{ MPa}$ ($G = 1,0\text{-}1,26 \text{ MPa}$)
- Número y espesor de las capas de elastómero: siete capas de 12 mm ($t_r = t_i = 12 \text{ mm}$; $T_q = 84 \text{ mm}$)
- Número y espesor de las placas de zunchados: seis placas de 4 mm ($t_s = 4 \text{ mm}$), en acero S-235, con 5 mm de recubrimiento lateral
- Número y espesor de las placas de extremo: dos placas (una placa superior y otra inferior) de $t_{se} = 18 \text{ mm}$ cada una, en acero S-235
- Altura total del apoyo: $T_b = 144 \text{ mm}$ (incluidas las placas de extremo)
- Área total en planta: $a \times b = 400 \times 500 = 200.000 \text{ mm}^2$
- Área efectiva: $A' = a' \times b' = 390 \times 490 = 191.100 \text{ mm}^2$
- Área en planta confinada: $A_I = 191.100 \text{ mm}^2$ ($A_I = A'$ porque no hay agujeros)
- Factor de forma de una capa de elastómero: $S = \frac{A_I}{l_p \cdot t_r} = \frac{191.100}{1.760 \cdot 12} = 9,05$

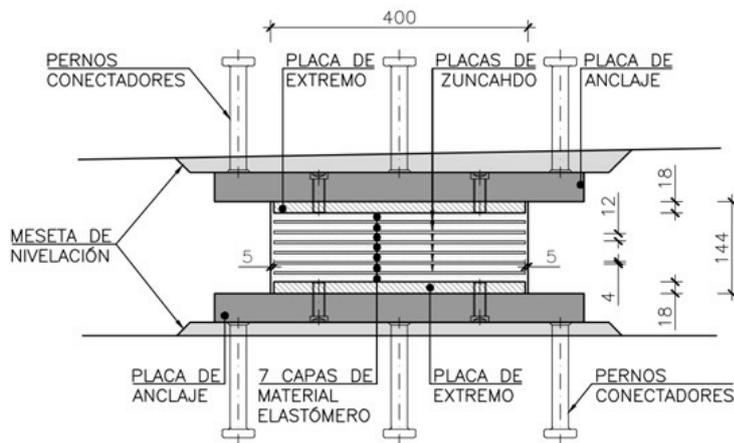


Figura 19 Aislador elastomérico en estribos según UNE-EN 1337-3

- Apoyos de pilas: apoyo circular de 900 mm de diámetro tipo B según la tabla 3 de UNE-EN 1337-3. Los apoyos tipo B transmiten toda la carga horizontal por fricción. Estos tipos de apoyos elastoméricos no podrían emplearse como aisladores sísmicos, ni del tipo LDRB "sencillo" ya que al no estar anclado no podría cumplir el apartado 7.6.2(4) de UNE-EN 1998-2; ni tampoco podrían emplearse como LDRB (sometido a "acciones sísmicas pequeñas" o no sometido a "acciones sísmicas pequeñas") ya que no satisface los requisitos del apartado 8.1 de UNE-EN 15129 en donde se exige que todos los aisladores se deben sujetar a la estructura mediante fijaciones mecánicas con capacidad para asumir la carga horizontal (o al menos el 75 %, siempre que se cumpla que la carga vertical se ha determinado mediante un análisis dinámico, por ejemplo modal espectral, y que el 25 % de carga horizontal restante se pueda resistir mediante fricción), y el apoyo tipo B transmite toda la carga horizontal por fricción. Por tanto, a efectos de esta guía, se mantendrán las dimensiones y composición del apoyo, pero se eliminan las capas exteriores de elastómero de 2,5 mm, se añaden placas

de extremo y se establece una fijación mecánica no normalizada mediante aislador empotrado en hueco mecanizado en las placas de anclaje, según el apartado 8.2.3.2 de UNE-EN 15129. Sus propiedades son las siguientes y se ilustran en la figura 20:

- Módulo de elasticidad transversal nominal: $G_g = 0,9 \text{ MPa}$ ($G = 1,0\text{-}1,26 \text{ MPa}$)
- Número y espesor de las capas de elastómero: cinco capas de 20 mm ($t_r = t_i = 20 \text{ mm}$; $T_q = 100 \text{ mm}$)
- Número y espesor de las placas de zunchado: cuatro chapas de 5 mm ($t_s = 5 \text{ mm}$), en acero S-235, con 5 mm de recubrimiento lateral
- Número y espesor de las placas de extremo: dos placas (una placa superior y otra inferior) de $t_{se} = 18 \text{ mm}$ cada una, empotradas 15 mm en las placas de anclaje, en acero S-235
- Altura total del apoyo: $T_b = 156 \text{ mm}$
- Área total en planta: $\pi D^2/4 = \pi \cdot 900^2/4 = 200.000 \text{ mm}^2$
- Área efectiva: $A' = \pi D'^2/4 = \pi \cdot 890^2/4 = 622.114 \text{ mm}^2$
- Área en planta confinada: $A_I = 191.100 \text{ mm}^2$ ($A_I = A'$ porque no hay agujeros)
- Factor de forma de una capa de elastómero: $S = \frac{A_I}{l_p \cdot t_r} = \frac{622.114}{2.796 \cdot 20} = 11,13$

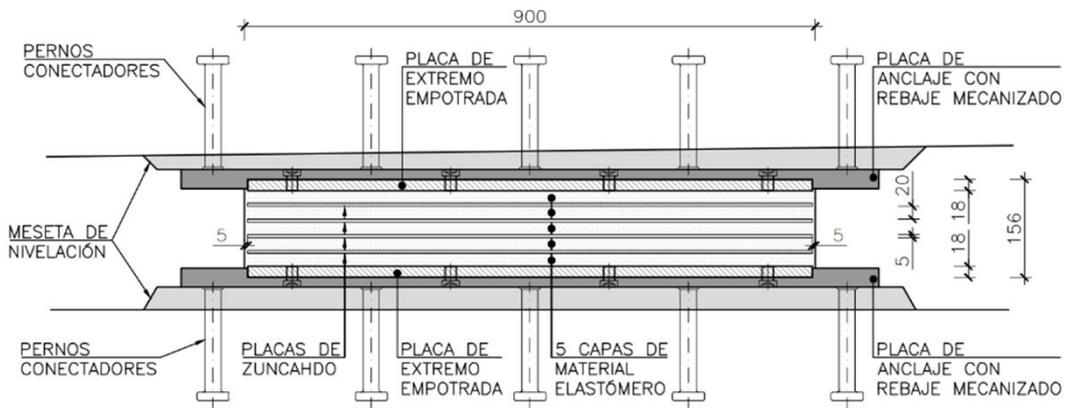
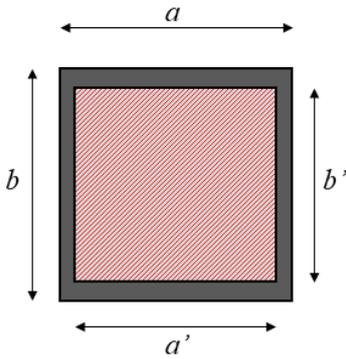
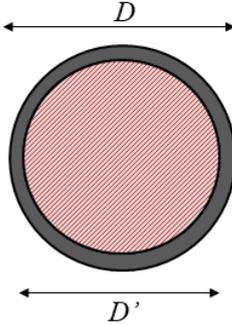


Figura 20 Aislador elastomérico en pilas según UNE-EN 1337-3

Los parámetros geométricos de ambos aisladores elastoméricos se han obtenido usando la siguiente formulación:

Aislador rectangular	Aislador circular
 <p> $A = ab$ $A' = a'b'$ $A_r = A' - b'v_{xd} - a'v_{yd}$ $S = \frac{a'b'}{2(a' + b')t_r}$ </p>	 <p> $A = \pi D^2/4$ $A' = \pi D'^2/4$ $A_r = \frac{1}{2} \left[\frac{4 \cdot A'}{\pi} \cdot \arcsen \left(\frac{\sqrt{D'^2 - v_{xy,d}^2}}{D'} \right) - \left(v_{xy,d} \sqrt{D'^2 - v_{xy,d}^2} \right) \right]$ $S = \frac{D'}{4t_r}$ </p>

Nota: Para el área efectiva reducida, A_r , en los aisladores circulares se ha considerado la formulación de la 2.ª generación prEN-1337-3 (para más información, ver la *Guía para el cálculo de aisladores elastoméricos de bajo amortiguamiento en zona sísmica* [20]).

Figura 21 Valores de los parámetros geométricos para aisladores rectangulares y circulares

8.2 Respuesta de los aisladores frente a las acciones no sísmicas en situación sísmica

Los desplazamientos de las acciones no sísmicas en situación sísmica pueden tener un impacto no despreciable en las comprobaciones según UNE-EN 15129 que se definen en el apartado 4.3 de esta guía. Estos desplazamientos se calculan teniendo en cuenta las rigideces de los aisladores elastoméricos, K_b (o $K_{b,eff}$), que son función del módulo de elasticidad transversal, G , y por tanto sensible a la variabilidad de las propiedades (DP, UBDP, LBDP).

La norma UNE-EN 15129 realiza todas las comprobaciones con el mismo módulo de rigidez transversal, ya sea para considerar el efecto bajo acciones sísmicas como bajo no sísmicas. Por este motivo, para las acciones no sísmicas de las comprobaciones según UNE-EN 15129, como simplificación, se van a utilizar los mismos valores límite de G .

Comentario: nótese que esta aproximación es suficientemente conservadora ya que el LBDP de G , que se asume en esta guía corresponde a $\alpha = 1$, en consonancia con una entrada en carga lenta frente a las acciones sísmicas, y por tanto unos mayores desplazamientos tanto sísmicos como no sísmicos. Del mismo modo, para el análisis con UBDP de G se adoptará $\alpha = 1,4$, incrementando el cortante horizontal de cálculo.

Los valores del módulo de elasticidad transversal, G , que se adoptan para las propiedades DP, UBDP y LBDP son los justificados en el apartado 5.2 de esta guía, y que se resumen a continuación. La nomenclatura G se utilizará siempre para el valor del módulo de elasticidad transversal con propiedades DP.

$$DP : G = \alpha G_g = 1,25 \cdot 0,9 = 1,125 \text{ MPa}$$

$$UBDP : G_{UB} = 2,00 \text{ MPa}$$

$$LBDP : G_{LB} = 0,77 \text{ MPa}$$

Se muestran en la tabla 11 los valores obtenidos para la rigidez efectiva de los aisladores empleando el valor nominal, K_b , y los valores límite superior e inferior de las propiedades del elastómero, $K_{b,UB}$ y $K_{b,LB}$.

Tabla 11 Características y propiedades en combinación sísmica de los apoyos elastoméricos dimensionados estrictamente según UNE-EN 1337-3

Apoyos elastoméricos		Dimensiones en planta (efectivas) [mm x mm]	Altura total de elastómero, T_q [mm]	K_b ^a [kN/m]	$K_{b,UB}$ ^a [kN/m]	$K_{b,LB}$ ^a [kN/m]
Estribos	Dos apoyos rectangulares	400 x 500 (390 x 490)	7 x 12 = 84	2.679	4.757	1.843
Pilas	Un apoyo circular	900 (890)	5 x 20 = 100	7.157	12.712	4.924

^a Rigidez lateral de cada apoyo elastomérico (no de cada eje de apoyo).

Con estas rigideces, se calculan las fuerzas y desplazamientos no sísmicos que serán utilizados en posteriores comprobaciones:

- Se calcula el desplazamiento d_G y la fuerza horizontal V_G debida a las acciones no sísmicas empleando las propiedades nominales (DP) y en la dirección principal longitudinal (X), según los apartados los apartados 7.6.2 de UNE-EN 1998-2 y 8.1 de UNE-EN 15129 con las expresiones (43) y (44).

$$d_G = d_{CP} + d_P + d_\infty + 0,5d_T \tag{43}$$

$$V_G = V_{CP} + V_P + V_\infty + 0,5V_T \tag{44}$$

Estos cálculos se detallan en la *Guía para el cálculo de apoyos elastoméricos. Ejemplo de aplicación* [19] y los resultados que se obtienen en ella se muestran en las tablas 12 y 13.

Tabla 12 **Estribos. Desplazamientos y fuerzas horizontales no sísmicas en la dirección principal longitudinal (X) calculados con DP**

Acción	d [mm]	V [kN]
d_{CP} / V_{CP} : Cargas permanentes máximas ^a	0,7	2
d_P / V_P : Pretensado (acortamiento elástico)	6,2	17
d_{∞} / V_{∞} : Diferidas (fluencia y retracción)	21,3	57
d_T / V_T : Térmico de contracción (acortamiento) ^b	13,2	30
$d_G = d_{CP} + d_P + d_{\infty} + 0,5 d_T$ $V_G = V_{CP} + V_P + V_{\infty} + 0,5 V_T$	34,9	93

^a Se demuestran despreciables los desplazamientos y fuerzas horizontales frente a la acción vertical de las cargas permanentes. En adelante no se considerarán.

^b Los valores de d_T (y V_T) incluidos en la tabla se corresponden con el térmico de contracción, ya que el de dilatación, pese a ser mayor, produce deformaciones en sentido contrario a d_{CP} , d_P y d_{∞} .

Tabla 13 **Pilas. Desplazamientos y fuerzas horizontales no sísmicas en la dirección principal longitudinal (X) calculados con DP**

Acción	d [mm]	V [kN]
d_{CP} / V_{CP} : Cargas permanentes máximas	1,9	14
d_P / V_P : Pretensado (acortamiento elástico)	2,0	14
d_{∞} / V_{∞} : Diferidas (fluencia y retracción)	5,2	37
d_T / V_T : Térmico de contracción (acortamiento) ^b	4,2	26
$d_G = d_{CP} + d_P + d_{\infty} + 0,5 d_T$ $V_G = V_{CP} + V_P + V_{\infty} + 0,5 V_T$	11,2	82

^b Los valores de d_T (y V_T) incluidos en la tabla se corresponden con el térmico de contracción, ya que el de dilatación, pese a ser mayor, produce deformaciones en sentido contrario a d_{CP} , d_P y d_{∞} .

- Se calcula el desplazamiento d_G y fuerza horizontal V_G debidos a las acciones no sísmicas calculadas con el límite superior (UBDP) e inferior (LBDP) de las propiedades del elastómero en la dirección principal longitudinal (X), para la comprobación de aisladores según los apartados los apartados 7.6.2 de UNE-EN 1998-2 y 8.1 de UNE-EN 15129. Los resultados se muestran en la Tabla 14, donde se han incluido también por conveniencia los correspondiente a las propiedades nominales.

Tabla 14 Desplazamientos y fuerzas horizontales no sísmicas en valores límite de propiedades

Apoyos elastoméricos	DP (nominal)		UBDP		LBDP	
	d_G [mm]	V_G [kN]	$d_{G,UB}$ [mm]	$V_{G,UB}$ [kN]	$d_{G,LB}$ [mm]	$V_{G,LB}$ [kN]
Estribos	34,9	93	34,8	166	35,0	65
Pilas	11,2	82	8,6	109	12,0	60

- Los desplazamientos d_G y fuerza horizontal V_G debida a las acciones no sísmicas calculados con propiedades DP, UBDP y LBDP en la dirección principal transversal (Y) son nulos. Es decir, $d_{G,y,E} = 0, V_{G,y,E} = 0, d_{G,y,P} = 0, V_{G,y,P} = 0$.
- Se calcula el área efectiva reducida, A_r , debida a las cargas no sísmicas en combinación sísmica teniendo en cuenta las propiedades DP, UBDP y LBDP, para la comprobación de aisladores según los apartados 8.2.3.3.2 y 8.2.3.3.4 de UNE-EN 15129. En el caso de las propiedades nominales (DP), utilizando la expresión 9 de UNE-EN 1337-3 y considerando $v_x = d_G$ y $v_y = 0$ (no hay acciones horizontales transversales no sísmicas en combinación sísmica), se tiene:

En estribos:

$$A_{r,E} = A' \cdot \left(1 - \frac{v_{x,d}}{a'} - \frac{v_{y,d}}{b'} \right) = 191.100 \cdot \left(1 - \frac{34,9}{390} - \frac{0}{490} \right) = 173.999 \text{ mm}^2$$

En pilas:

$$A_{r,P} = A' \cdot \left(1 - \frac{v_{x,d}}{a'} - \frac{v_{y,d}}{b'} \right) = 622.114 \cdot \left(1 - \frac{11,2}{890} - \frac{0}{890} \right) = 614.285 \text{ mm}^2$$

- **Comentario:** La 2.^a generación de la norma EN-1337-3, la prEN 1337-3 (2018), incluye una formulación particular para un cálculo más preciso de A_r en aisladores circulares (expresión (28)). Se comprueba que la diferencia entre la aplicación de la expresión vigente y la de la pre-norma es reducida (0,35 % de diferencia). En adelante, en esta guía, se aplicará la expresión de prEN 1337-3, ya que proporciona un A_r levemente inferior, lo cual será conservador. Se muestra a continuación el resultado de A_r en las pilas obtenido con dicha expresión:

$$\begin{aligned}
 A_{r,P} &= \frac{1}{2} \left[\frac{4 \cdot A'}{\pi} \cdot \arcsen \left(\frac{\sqrt{D'^2 - v_{xy,d}^2}}{D'} \right) - \left(v_{xy,d} \sqrt{D'^2 - v_{xy,d}^2} \right) \right] = \\
 &= \frac{1}{2} \left[\frac{4 \cdot 622.114}{\pi} \cdot \arcsen \left(\frac{\sqrt{890^2 - 11,2^2}}{890} \right) - \left(11,2 \cdot \sqrt{890^2 - 11,2^2} \right) \right] = \\
 &= 612.146 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

El resumen del cálculo de A_r con las UBDP y LBD del elastómero se muestra en la Tabla 15, donde se ha incluido por conveniencia también el A_r obtenido con propiedades nominales (DP).

Tabla 15 Área efectiva reducida en valores límite de propiedades

Apoyos elastoméricos	DP (nominal)	UBDP	LBDP
	A_r [mm ²]	$A_{r,UB}$ [mm ²]	$A_{r,LB}$ [mm ²]
Estribos	173.999	174.048	173.950
Pilas	612.146	614.460	611.434

8.3 Respuesta de los aisladores frente a la acción sísmica empleando el método del modo fundamental

El cálculo de la respuesta de los apoyos elastoméricos dimensionados según UNE-EN 1337-3 [19] como aisladores elastoméricos según UNE-EN 15129 frente a acciones sísmicas, se realiza teniendo en cuenta los valores de límite superior e inferior de las propiedades ($G_{UB} = 2,00$ MPa; $G_{LB} = 0,77$ MPa), que incluyen la aplicación del coeficiente de amplificación de la rigidez por acción sísmica, α , según se explica en el apartado 5.1 de esta guía. Pese a que el cálculo debe realizarse con propiedades LBDP y UBDP, con fines didácticos también se ha hecho con las propiedades nominales (DP). La tabla 11 muestra las rigideces efectivas de los aisladores que se tienen en cuenta para el cálculo con la acción sísmica con propiedades DP, UBDP y LBDP.

El análisis sísmico se puede realizar mediante el método espectral según el modo fundamental (1 *gdl*) o el método multimodal (ver apartado 6 de esta guía). En puentes muy regulares, como es el caso del ejemplo de esta guía, los resultados de ambos métodos son muy similares. Especialmente en la dirección longitudinal, donde el tablero tiene un claro comportamiento de diafragma rígido. En dirección transversal el tablero es menos rígido, aunque por lo general, el efecto de la deformación transversal será casi despreciable.

Para la comprobación del funcionamiento de estos apoyos elastoméricos como aisladores, se va a utilizar el método del modo fundamental, si bien, perfectamente se podría haber utilizado el método multimodal. El análisis mediante el método del modo fundamental (ver apartado 6 de esta guía) proporciona resultados muy aproximados. Los cálculos deben realizarse en la dirección horizontal principal longitudinal (X), en la dirección horizontal principal transversal (Y), y en la dirección principal vertical (Z) con la componente vertical del sismo (apartado 4.3.3.5.2 de UNE-EN 1998-1).

A continuación, en el apartado 8.3.1, se expone el cálculo detallado paso a paso de los efectos de las acciones sísmicas en términos de desplazamientos y fuerzas cortantes en los aisladores, aplicando el método espectral del modo fundamental con propiedades nominales (DP). En el apartado se presenta el resumen de resultados del mismo cálculo, también con propiedades UBDP y LBDP, ofreciendo las conclusiones relativas a la validez como aisladores LDRB de los apoyos elastoméricos definidos según UNE-EN 1337-3 en la *Guía para el cálculo de apoyos elastoméricos. Ejemplo de aplicación* [19].

8.3.1 Análisis detallado de la respuesta con propiedades DP

Se muestra a continuación, a modo de ejemplo desarrollado paso a paso, el cálculo detallado con propiedades nominales ($G = 1,25$ MP, según el apartado 5.1 de esta guía).

La rigidez efectiva total del sistema de 1 grado de libertad, K_{eff} , en una dirección principal, se obtiene como suma en paralelo de las rigideces laterales en esa dirección de todos los sistemas de soporte: dos estribos ($n_E = 2$) y dos pilas ($n_P = 2$). La rigidez de cada sistema de soporte se obtiene, a su vez, como suma en serie de las rigideces laterales de estribos, K_E , o pilas, K_P , y sus correspondientes aisladores elastoméricos, K_b (o $K_{b,eff}$) ($n_{b,E} = 2$ en estribos y $n_{b,P} = 1$ en pilas) en la dirección principal considerada (X o Y).

En el ejemplo de esta guía, se supondrá que los estribos presentan rigidez infinita ($K_E = \infty$). Como además las pilas son circulares y la rigidez de los aisladores no depende de su forma en planta, sino de su área horizontal efectiva, A_I , la respuesta sísmica con el método del modo fundamental será la misma en las dos direcciones principales, X e Y . Este no sería el caso si, por ejemplo, los apoyos de pilas fueran mediante dintel transversal y doble pila, o si las pilas fueran de sección no doblemente simétrica en las dos direcciones principales.

La rigidez de las pilas se ha obtenido en el apartado 5.5 de esta guía y la de los aisladores se resume en la tabla 11. La rigidez efectiva total del sistema vale:

$$\begin{aligned}
 K_{eff} &= \frac{n_E}{\left(\frac{1}{K_E} + \frac{1}{n_{b,E} \cdot K_{b,E}}\right)} + \frac{n_P}{\left(\frac{1}{K_{P,1}} + \frac{1}{n_{b,P} \cdot K_{b,P}}\right)} + \frac{n_P}{\left(\frac{1}{K_{P,2}} + \frac{1}{n_{b,P} \cdot K_{b,P}}\right)} = \\
 &= \frac{2}{\left(\frac{1}{\infty} + \frac{1}{2 \cdot 2.679}\right)} + \frac{1}{\left(\frac{1}{13.823} + \frac{1}{7.157}\right)} + \frac{1}{\left(\frac{1}{12.528} + \frac{1}{7.157}\right)} = 19.984 \text{ kN/m}
 \end{aligned}$$

Con la rigidez efectiva del sistema, K_{eff} , y la masa aislada, M (apartado 5.6 de esta guía), se obtiene el periodo efectivo T_{eff} , en cada dirección principal:

$$T_{eff} = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K_{eff}}} = 2\pi \sqrt{\frac{1.604}{19.984}} = 1,78 \text{ seg}$$

Entrando en el eje de abscisas del espectro de respuesta de cálculo (figura 21) con el periodo efectivo, T_{eff} , se obtiene la aceleración espectral, $S_a = 0,213g$, que, multiplicada por la masa aislada, M , da el cortante basal sísmico del puente, V_{cd} .

$$V_{cd} = M \cdot S_a = 1.604 \cdot 0,211 \cdot 9,81 = 3.324 \text{ kN}$$

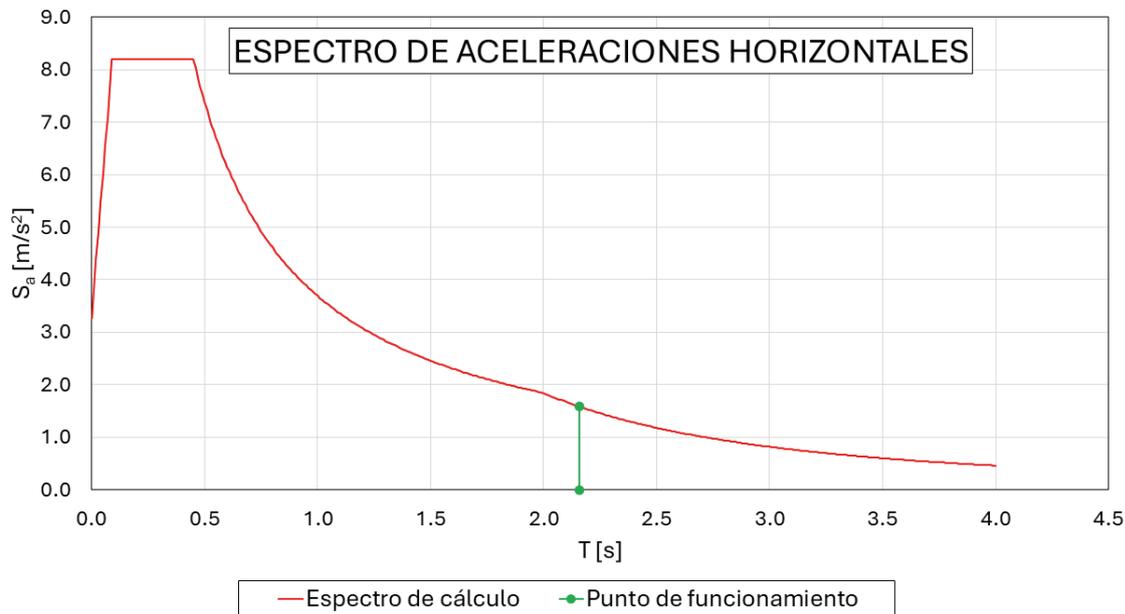


Figura 22 Representación de la respuesta del sistema de aislamiento de los apoyos elastoméricos utilizados como aisladores frente a la sollicitación sísmica definida en el apartado 4.1

El cortante basal sísmico del puente, V_{cd} , se distribuye entre estribos y pilas proporcionalmente a su rigidez lateral, obteniéndose la fuerza horizontal sísmica de cálculo, $V_{bd,E}$ y $V_{bd,P}$, en cada aislador de estribo y pila, respectivamente, en cada dirección principal (en este ejemplo, $V_{bd,E} = V_{bd,E,x} = V_{bd,E,y}$, y $V_{bd,P} = V_{bd,P,x} = V_{bd,P,y}$). Las pilas tienen una altura un poco distinta (30 cm de diferencia) aunque los aisladores utilizados son los mismos, por lo que las fuerzas en las pilas no serán exactamente iguales; a efectos de verificación, se toma la pila que soporta mayor cortante horizontal:

$$V_{bd,E} = V_{cd} \cdot \frac{\frac{1}{\left(\frac{1}{K_E} + \frac{1}{n_{b,E} \cdot K_{b,E}}\right)}}{n_{b,E} \cdot K_{eff}} = 3.324 \cdot \frac{\frac{1}{\left(\frac{1}{\infty} + \frac{1}{2 \cdot 2.679}\right)}}{2 \cdot 19.984} = 445,5 \text{ kN}$$

$$V_{bd,P1} = V_{cd} \cdot \frac{\frac{1}{\left(\frac{1}{K_{P1}} + \frac{1}{n_{b,P} \cdot K_{b,P}}\right)}}{n_{b,P} \cdot K_{eff}} = 3.324 \cdot \frac{\frac{1}{\left(\frac{1}{13.823} + \frac{1}{7.157}\right)}}{19.984} = 784,3 \text{ kN}$$

$$V_{bd,P2} = V_{cd} \cdot \frac{\frac{1}{\left(\frac{1}{K_{P2}} + \frac{1}{n_{b,P} \cdot K_{b,P}}\right)}}{n_{b,P} \cdot K_{eff}} = 3.324 \cdot \frac{\frac{1}{\left(\frac{1}{12.528} + \frac{1}{7.157}\right)}}{19.984} = 757,6 \text{ kN}$$

$$V_{bd,P} = \max(V_{bd,P1}; V_{bd,P2}) = 784,3 \text{ kN}$$

A partir de las fuerzas horizontales sísmicas de cálculo de cada elemento (estribo o pilas), se obtiene el desplazamiento sísmico de cálculo $d_{bd,E}$, de los aisladores que apoyan sobre el mismo en cada dirección principal ($d_{bd,E} = d_{bd,E,x} = d_{bd,E,y}$, y $d_{bd,P} = d_{bd,P,x} = d_{bd,P,y}$). A efectos de comprobación de desplazamientos se toma el aislador de la pila que soporta mayor cortante horizontal.

$$d_{bd,E} = \frac{V_{bd,E}}{K_{b,E}} = \frac{445,5}{2.679} = 0,1663 \text{ m} = 166,3 \text{ mm}$$

$$d_{bd,P1} = \frac{V_{bd,P1}}{K_{b,P}} = \frac{784,3}{7.157} = 0,1096 \text{ m} = 109,6 \text{ mm}$$

$$d_{bd,P2} = \frac{V_{bd,P2}}{K_{b,P}} = \frac{757,6}{7.157} = 0,1058 \text{ m} = 105,8 \text{ mm}$$

$$d_{bd,P} = \max(d_{bd,P1}; d_{bd,P2}) = 109,6 \text{ mm}$$

A partir de la aceleración espectral, S_a , y del periodo efectivo, T_{eff} , se calcula también el desplazamiento en el centro de rigidez del tablero, d_{cd} , en la dirección de la acción sísmica considerada mediante la expresión $d_{cd} = S_a T_{eff}^2 / (4\pi^2)$. Nótese que esta expresión es la fórmula general a partir de la cual se han obtenido las expresiones particulares para calcular d_{cd} de la tabla 7.1 de UNE-EN 1998-2. Para el puente de este ejemplo:

$$d_{cd} = \frac{S_a T_{eff}^2}{4\pi^2} = 0,211 \cdot 9,81 \cdot \frac{1,78^2}{4\pi^2} = 0,1663 \text{ m} = 166,3 \text{ mm}$$

Comentario: la expresión incluida en la tabla 7.1 UNE-EN 1998-2 proporciona el mismo resultado que se obtiene dividiendo el cortante basal sísmico del puente, V_{cd} , entre la rigidez efectiva, K_{eff} del sistema:

$$d_{cd} = \frac{S_a T_{eff}^2}{4\pi^2} = \frac{S_a M}{K_{eff}} = \frac{V_{bd,Tot}}{K_{eff}} = \frac{3.324}{20.019} = 0,1663 \text{ m} = 166,3 \text{ mm}$$

El desplazamiento máximo de cálculo en cada dirección principal, d_{max} , se obtiene mediante la suma de los desplazamientos no sísmicos en la dirección elegida, d_G , de la combinación sísmica, recogidos en la tabla 14 del apartado 8.1 de esta guía; y el desplazamiento sísmico de cálculo en la misma dirección principal, d_{bd} , incrementado por el factor de fiabilidad γ_x (ver expresión (2) de esta guía). En este ejemplo, calculado según el método del modo fundamental, trivialmente va a ser más desfavorable la dirección principal longitudinal (X), ya que $d_{bd} = d_{bd,x} = d_{bd,y}$, y $d_{G,y} = 0$ (no hay deformaciones de pretensado, diferidas o por térmico en dirección transversal).

- En la dirección principal longitudinal (X), para los aisladores de estribos y pilas calculados con propiedades nominales (DP):

$$d_{max,E,x} = \gamma_x \cdot d_{bd,E,x} + d_{G,E,x} = 1,5 \cdot 166,3 + 34,9 = 284,4 \text{ mm}$$

$$d_{max,P,x} = \gamma_x \cdot d_{bd,P,x} + d_{G,P,x} = 1,5 \cdot 109,6 + 11,2 = 176,6 \text{ mm}$$

- En la dirección principal transversal (Y), para los aisladores de estribos y pilas, para los aisladores de estribos y pilas, calculados con propiedades nominales (DP):

$$d_{max,E,y} = \gamma_x \cdot d_{bd,E,y} + d_{G,E,y} = 1,5 \cdot 166,3 + 0 = 249,5 \text{ mm}$$

$$d_{max,P,y} = \gamma_x \cdot d_{bd,P,y} + d_{G,P,y} = 1,5 \cdot 109,6 + 0 = 164,4 \text{ mm}$$

8.3.1.1 Respuesta en desplazamientos para verificar los aisladores elastoméricos como “sencillos” según UNE-EN 1998-2

El desplazamiento $v_{xy,d}$ con el que se verifican los aisladores elastoméricos “sencillos” según el apartado 7.6.2(5) de UNE-EN 1998-2, es la suma vectorial del desplazamiento máximo en cada dirección principal, d_{max} , que se obtiene según se indica en la expresión (37):

$$v_{xy,d,E} = \sqrt{d_{max,E,x}^2 + d_{max,y,E}^2} = \sqrt{284,4^2 + 249,5^2} = 378,3 \text{ mm}$$

$$v_{xy,d,P} = \sqrt{d_{max,P,x}^2 + d_{max,P,y}^2} = \sqrt{176,6^2 + 164,4^2} = 241,3 \text{ mm}$$

Se aprecia que los desplazamientos de cálculo para la verificación de los aisladores “sencillos” son considerablemente superiores a los desplazamientos máximos en cada dirección principal horizontal que se utilizan en el caso general.

8.3.2 Análisis resumido de la respuesta con propiedades UBDP y LBDP

Se muestran a continuación, en las tablas 16 y 17, el resumen de respuestas obtenidas aplicando el procedimiento detallado del apartado 8.3.1, pero usando en esta ocasión las propiedades UBDP y LBDP que se definen en la tabla 11. A su vez, el desplazamiento debido a las acciones no sísmicas en situación sísmica, d_G , necesario para obtener d_{max} en cada dirección principal, se ha tomado de la tabla 14. Se han incluido también por conveniencia los resultados con DP.

Tabla 16 Estribos. Deformación tangencial frente a la sollicitación sísmica

Propiedades	V_{bd} [kN]	$d_{bd,x} = d_{bd,y}$ [mm]	$\gamma_x \cdot d_{bd,x} = \gamma_y \cdot d_{bd,y}$ [mm]	d_G [mm]		d_{max} [mm]	
DP	445,5	166,3	249,5	$d_{G,x}$	34,9	$d_{max,x}$	284,4
				$d_{G,y}$	0	$d_{max,y}$	249,5
UBDP	625,5	131,5	197,2	$d_{G,x}$	34,9	$d_{max,x}$	232,1
				$d_{G,y}$	0	$d_{max,y}$	197,2
LBDP	344,8	187,1	280,6	$d_{G,x}$	34,9	$d_{max,x}$	315,5
				$d_{G,y}$	0	$d_{max,y}$	280,6

Tabla 17 Pilas. Deformación tangencial frente a la sollicitación sísmica

Propiedades	V_{bd} [kN]	$d_{bd,x} = d_{bd,y}$ [mm]	$\gamma_x \cdot d_{bd,x} = \gamma_y \cdot d_{bd,y}$ [mm]	d_G [mm]		d_{max} [mm]	
DP	784,3	109,6	164,4	$d_{G,x}$	11,2	$d_{max,x}$	175,6
				$d_{G,y}$	0	$d_{max,y}$	164,4
UBDP	870,7	68,5	102,8	$d_{G,x}$	11,2	$d_{max,x}$	114,0
				$d_{G,y}$	0	$d_{max,y}$	102,8
LBDP	679,2	137,9	206,9	$d_{G,x}$	11,2	$d_{max,x}$	218,1
				$d_{G,y}$	0	$d_{max,y}$	206,9

Como ocurre en la mayoría de los casos (aunque no siempre), el análisis con las propiedades UBDP es el que proporciona los menores desplazamientos y las mayores reacciones, por lo que será el análisis que condicione el dimensionamiento de la subestructura. Por el contrario, el análisis con las propiedades LBDP da lugar a los mayores desplazamientos, por lo que será el análisis que condicione el dimensionamiento de los aisladores.

Los desplazamientos sísmicos de cálculo del centro de rigidez del tablero respecto del suelo, d_{cd} , que se muestran en la tabla 18, utilizando las propiedades UBDP y LBDP, difieren en más de un 15 % respecto del obtenido con las propiedades nominales (DP). En concreto, es el caso de análisis con propiedades UBDP el que supera dicho límite del 15 %. Por lo tanto, según se indica en el apartado 6.2 de esta guía, no se estarían cumpliendo las premisas que permiten realizar un posterior análisis de detalle, en caso de que fuera necesario, mediante el método espectral multimodal o mediante un cálculo dinámico directo utilizando únicamente las propiedades DP.

Tabla 18 Desplazamiento sísmico de cálculo del centro de rigidez del tablero, d_{cd}

Propiedades	d_{cd} [mm]	$\Delta d_{cd}/d_{c,DP}$
DP	166,3	0,00 %
UBDP	131,5	-20,92 %
LBDP	187,1	12,51 %

8.4 Análisis de viabilidad del uso de los apoyos elastoméricos como aisladores sísmicos utilizando la respuesta sísmica obtenida con el método del modo fundamental

En este apartado se analiza si es viable emplear los apoyos elastoméricos proyectados para cumplir los criterios de UNE-EN 1337-3, como aisladores sísmicos elastoméricos de bajo amortiguamiento (LDRB). Con la información relativa a la respuesta frente a sollicitaciones sísmicas y no sísmicas de los apartados anteriores, se realizan comprobaciones de deformaciones tangenciales frente a los desplazamientos laterales de la situación sísmica. De esta forma, se puede comprobar si se cumplen los criterios normativos de deformación tangencial máxima, que suelen ser los más restrictivos en el dimensionamiento o verificación de un aislador elastomérico.

8.4.1 Viabilidad de los aisladores elastoméricos con propiedades DP

En esta guía se va a realizar en primer lugar el análisis con propiedades nominales (DP). Esta comprobación es útil ya que, si se produce el incumplimiento de los requisitos de comprobación con propiedades DP, automáticamente queda descartada la viabilidad del uso del apoyo elastomérico como aislador, sin necesidad de comprobar con UBDP y LBDP. Si se cumplen los requisitos de comprobación con propiedades DP es necesario que los aisladores se verifiquen también con propiedades UBDP y LBDP.

8.4.1.1 Viabilidad de los apoyos elastoméricos como aisladores LDRB "sencillos" según UNE-EN 1998-2

Se comprueba en primer lugar si se cumple el requisito de deformaciones tangenciales en los apoyos elastoméricos de estribos, $\varepsilon_{q,d,E}$, y de pilas $\varepsilon_{q,d,P}$, calculados según el apartado 7.6.2(2) y 7.6.2(6) de UNE-EN 1998-2 empleando las propiedades nominales del elastómero, para determinar si son menores de 2 (200 %) y se pueden tratar los apoyos elastoméricos como aisladores sísmicos "sencillos":

$$\varepsilon_{q,d,E} = \frac{v_{xy,d,E}}{T_{q,E}} = \frac{378,3}{84} = 4,50 > 2$$

$$\varepsilon_{q,d,P} = \frac{v_{xy,d,P}}{T_{q,P}} = \frac{241,3}{100} = 2,41 > 2$$

Luego, no se pueden tratar estos apoyos elastoméricos como LDRB "sencillos". Nótese que el desplazamiento de cálculo se ha obtenido componiendo vectorialmente los desplazamientos en las dos direcciones principales (ver apartado 8.3.1.1 de esta guía), mientras que las comprobaciones de los apartados siguientes se realizan en cada dirección principal por separado.

8.4.1.2 Viabilidad de los apoyos elastoméricos como aisladores LDRB que se consideran sometidos a "acciones sísmicas pequeñas" según UNE-EN 15129 y UNE-EN 1998-2

Se analiza, a continuación, si los apoyos elastoméricos pueden considerarse como aisladores sísmicos de tipo LDRB sometidos a "acciones sísmicas pequeñas" según el apartado 8.2.1.1 de UNE-EN 15129 (ver apartado 4.3.4 de esta guía), y por tanto se pueden eximir del cumplimiento de algunos de los requisitos de UNE-EN 15129. En la dirección principal longitudinal, X , y empleando las propiedades nominales (DP) del elastómero se tienen los desplazamientos resumidos en las tablas 16 y 17:

$$d_{bd,x,E} = 166,3 \text{ mm} > d_{G,x,E} = 34,9 \text{ mm}; V_{bd,x,E} = 445,5 \text{ kN} > V_{G,x,E} = 93 \text{ kN}$$

$$d_{bd,x,P} = 109,6 \text{ mm} > d_{G,x,P} = 11,2 \text{ mm}; V_{bd,x,P} = 784,3 \text{ kN} > V_{G,x,P} = 82 \text{ kN}$$

Se demuestra, por tanto, que los aisladores no pueden considerarse sometidos a "acciones sísmicas pequeñas" ya que no se cumplen las condiciones del apartado 8.2.1.1 de UNE-EN 15129. En la dirección principal transversal, Y , obviamente tampoco se va a cumplir la condición de desplazamientos porque $d_G = 0$. En cualquier caso, es suficiente que no cumpla en una dirección para no poder tratarlos como LDRB sometidos a "acciones sísmicas pequeñas". Esto obliga a que los aisladores cumplan con la totalidad de los requisitos de UNE-EN 15129 para LDRB.

8.4.1.3 Viabilidad de los apoyos elastoméricos como aisladores LDRB según UNE-EN 15129 y UNE-EN 1998-2

Se calcula la deformación tangencial máxima frente al desplazamiento lateral, $\varepsilon_{q,max}$, ya que habitualmente es el criterio de dimensionamiento que establece si un apoyo elastomérico puede ser un aislador LDRB o no. Esta deformación tangencial, que es debida al desplazamiento máximo de cálculo, d_{max} , en cada dirección principal, se compara con el valor máximo de 2,5 (250 %) establecido por UNE-EN 15129 en su apartado 8.2.3.4.1 (expresión (39) de esta guía). En la dirección principal longitudinal, X , y empleando las propiedades nominales (DP) del elastómero con las que se obtienen los desplazamientos de respuesta resumidos en las tablas 16 y 17, se tiene:

$$\varepsilon_{q,max,x,E} = \frac{d_{max,x,E}}{T_{q,E}} = \frac{284,4}{84} = 3,385 > 2,5$$

$$\varepsilon_{q,max,x,P} = \frac{d_{max,x,P}}{T_{q,P}} = \frac{175,6}{100} = 1,756 < 2,5$$

Y en la dirección principal transversal, Y , con las propiedades nominales del elastómero se obtiene:

$$\varepsilon_{q,max,y,E} = \frac{d_{max,y,E}}{T_{q,E}} = \frac{249,5}{84} = 2,970 > 2,5$$

$$\varepsilon_{q,max,y,P} = \frac{d_{max,y,P}}{T_{q,P}} = \frac{164,4}{100} = 1,644 < 2,5$$

Se observa en el cálculo realizado con propiedades nominales (DP) que los apoyos de los estribos no cumplen los requisitos del apartado 8.2.3.4.1 de UNE-EN 15129 para poder considerarlos como aisladores sísmicos. Los apoyos de las pilas cumplen si se emplean las propiedades nominales del elastómero, pero habrá que comprobar si siguen cumpliendo cuando se utilizan las propiedades de límite inferior (LBDP), ya que los valores no están lejos del límite.

8.4.2 Viabilidad de los aisladores elastoméricos con propiedades UBDP y LBDP

Se ha visto en el apartado anterior que los apoyos elastoméricos de los estribos proyectados con UNE-EN 1337-3 no cumplen los requisitos para poder considerarlos como aisladores sísmicos, y ello obligará a un redimensionado. Este redimensionado afectará en general también a los apoyos de las pilas. Aunque las verificaciones de viabilidad con propiedades UBDP y LBDP habría que hacerlas directamente para el nuevo dimensionado de aisladores, por motivos didácticos se realiza en este apartado también con el dimensionado de los apartados anteriores.

Los cálculos de $V_{bd,x,E}$, $V_{bd,y,E}$, $d_{bd,x,E}$, $d_{bd,y,E}$, $d_{max,x,E}$, $d_{max,y,E}$ para los apoyos de los estribos y $V_{bd,x,P}$, $V_{bd,y,P}$, $d_{bd,x,P}$, $d_{bd,y,P}$, $d_{max,x,P}$, $d_{max,y,P}$ para los de las pilas se repitieron empleando las UBDP y las LBDP del elastómero en el apartado 8.3.2. Los resultados se encuentran resumidos en la tabla 16 para los apoyos de los estribos, y en la Tabla 17 para los apoyos de las pilas. El cálculo de la deformación tangencial debida al desplazamiento lateral, $\varepsilon_{q,max}$, empleando las UBDP y las LBDP, se muestra resumido en las tablas 19 y 20, en donde también se incluyen, por conveniencia, los resultados con DP.

Tabla 19 Estribos. Deformación tangencial debida al desplazamiento lateral d_{max} en cada dirección principal con DP, UBDP y LBDP

Propiedades	V_{bd} [kN]	$d_{bd,x} = d_{bd,y}$ [mm]	d_{max} [mm]		$\varepsilon_{q,max}$		
DP	445,5	166,3	$d_{max,x}$	284,4	$\varepsilon_{q,max,x}$	3,385	> 2,5
			$d_{max,y}$	249,5	$\varepsilon_{q,max,y}$	2,970	> 2,5
UBDP	625,5	131,5	$d_{max,x}$	232,1	$\varepsilon_{q,max,x}$	2,762	> 2,5
			$d_{max,y}$	197,2	$\varepsilon_{q,max,y}$	2,348	< 2,5
LBDP	344,8	187,1	$d_{max,x}$	315,5	$\varepsilon_{q,max,x}$	3,756	> 2,5
			$d_{max,y}$	280,6	$\varepsilon_{q,max,y}$	3,341	> 2,5

En los estribos, los apoyos están sometidos a deformaciones tangenciales muy elevadas, tanto con el valor nominal como con los límites superior e inferior de las propiedades del elastómero. Por lo tanto, se puede concluir que los apoyos elastoméricos situados en los estribos utilizados en la *Guía para el cálculo de apoyos elastoméricos. Ejemplo de aplicación* [19] no pueden emplearse como aisladores sísmicos, por lo que se debe dimensionar un nuevo aislador elastomérico para los estribos que cumpla con los requerimientos de UNE-EN 15129 y UNE-EN 1998-2.

Tabla 20 Pilas. Deformación tangencial debida al desplazamiento lateral d_{max} en cada dirección principal con DP, UBDP y LBDP

Propiedades	V_{bd} [kN]	$d_{bd,x} = d_{bd,y}$ [mm]	d_{max} [mm]		$\varepsilon_{q,max}$		
DP	784,3	109,6	$d_{max,x}$	175,6	$\varepsilon_{q,max,x}$	1,756	< 2,5
			$d_{max,y}$	164,4	$\varepsilon_{q,max,y}$	1,644	< 2,5
UBDP	870,7	68,5	$d_{max,x}$	114,0	$\varepsilon_{q,max,x}$	1,140	< 2,5
			$d_{max,y}$	102,8	$\varepsilon_{q,max,y}$	1,028	< 2,5
LBDP	679,2	137,9	$d_{max,x}$	218,1	$\varepsilon_{q,max,x}$	2,181	< 2,5
			$d_{max,y}$	206,9	$\varepsilon_{q,max,y}$	2,069	< 2,5

En las pilas, los apoyos elastoméricos presentan deformaciones tangenciales razonables y por debajo de los límites para poder utilizarlo como aislador sísmico. Esto es debido a que, pese a que los apoyos de las pilas son más rígidos que las parejas de apoyos de los estribos ($K_{b,P} = 7.157$ kN/m frente a $2 \cdot K_{b,E} = 5.358$ kN/m, en propiedades nominales), la rigidez lateral del sistema pila + aislador es inferior a la del estribo + aisladores ($K_{P+b} = 4.555$ kN/m frente a $K_{E+2b} = 5.358$ kN/m, en propiedades nominales). Este efecto sería más acusado si se hubiera empleado la rigidez lateral fisurada para las pilas, según se indica en el apartado 5.5 de esta guía. En cualquier caso, el cumplimiento de los requisitos de deformación tangencial expuestos anteriormente ha servido para determinar si los apoyos elastoméricos se pueden emplear

como aisladores sísmicos, pero no garantizan el cumplimiento del resto de condiciones que establece UNE-EN 1998-2 y UNE-EN 15129. Además, en general, la modificación de los apoyos elastoméricos de los estribos para que cumplan con UNE-EN 1998-2 y UNE-EN 15129 y poder utilizarlos como aisladores sísmicos, tiene implicaciones sobre los apoyos elastoméricos de las pilas, ya que se modificará la distribución de rigideces entre los ejes de apoyo del tablero.

8.4.3 Conclusiones relativas a la viabilidad del uso de los apoyos elastoméricos como aisladores sísmicos

Del análisis de viabilidad de utilización de los apoyos elastoméricos definidos frente a situaciones no sísmicas, según la norma UNE-EN 1337-3, en la *Guía para el cálculo de apoyos elastoméricos. Ejemplo de aplicación* [19] como aisladores sísmicos, se puede concluir que, para el puente aislado estudiado en este ejemplo:

- Los apoyos elastoméricos no pueden considerarse aisladores elastoméricos "sencillos" según UNE-EN 1998-2, tal y como se demuestra en el apartado 8.4.1.1 de esta guía.
- Los apoyos elastoméricos no pueden considerarse tampoco como aisladores elastoméricos sometidos a "acciones sísmicas pequeñas" según UNE-EN 15129, tal y como se demuestra en el apartado 8.4.1.2 de esta guía.
- Los apoyos elastoméricos de los estribos no se pueden utilizar como aisladores elastoméricos LDRB porque tampoco cumplen la condición de desplazamiento máximo para poder considerarlos como no sometidos a "acciones sísmicas pequeñas". Por lo tanto, deben redimensionarse.
- Los apoyos elastoméricos de las pilas, *a priori*, sí que se pueden utilizar como aisladores elastoméricos LDRB. Sin embargo, debe verificarse antes que cumplen con el resto de los requisitos de UNE-EN 15129 desarrollados en el apartado 7 de esta guía. Además, el redimensionamiento de los aisladores de los estribos inevitablemente va a afectar a la respuesta en las pilas, por lo que lo razonable es redimensionarlos también siguiendo una estrategia de aislamiento sísmico que permita reducir sustancialmente los esfuerzos sobre la subestructura debidos al sismo.

9

DIMENSIONAMIENTO SÍSMICO DE AISLADORES ELASTOMÉRICOS SEGÚN UNE-EN 15129 Y UNE-EN 1998-2

En el apartado 8 anterior se ha concluido que los apoyos elastoméricos dimensionados estrictamente para satisfacer la norma UNE-EN 1337-3 no cumplen los requisitos de UNE-EN 1998-2 para poder ser considerados aisladores LDRB "sencillos" (véase la definición en apartados 7.2 y 7.5.2.3.3(5) de UNE-EN 1998-2) y eximirlos del cumplimiento de la norma UNE-EN 15129. Tampoco cumplen los requisitos de la norma UNE-EN 15129 para poder considerarse como aisladores LDRB (no "sencillos"). En definitiva, no pueden ser empleados como aisladores sísmicos de tipo LDRB en el caso del puente ejemplo objeto de estudio y para el nivel de sismicidad de la zona donde se ha supuesto ubicado. Aunque en este ejemplo los apoyos que no cumplen son los de los estribos, el redimensionado de los mismos afectaría también a los apoyos de las pilas por lo que, en su conjunto, la solución de apoyos elastoméricos dimensionados para cumplir estrictamente la norma UNE-EN 1337-3 no es satisfactoria. Si se quiere mantener la solución de aislamiento sísmico a base de LDRB, hay que redimensionar de inicio unos nuevos apoyos (aisladores) elastoméricos. De esto se ocupa este apartado 9. Los nuevos aisladores elastoméricos se van a dimensionar inicialmente para que cumplan los requisitos que establecen las normas UNE-EN 1337-3 y UNE-EN 15129 para poder ser considerados como aisladores sísmicos de tipo LDRB (no "sencillos") por la norma UNE-EN 1998-2. Después se realizarán las comprobaciones que exige la norma sísmica UNE-EN 1998-2 para garantizar que el puente tiene el nivel de seguridad adecuado frente a sismo.

El dimensionado de los apoyos elastoméricos como aisladores sísmicos implica siempre un proceso iterativo. Esto es debido a que, si bien la distribución de las cargas verticales no es dependiente de la rigidez de los aisladores, sí lo es la distribución de las fuerzas horizontales y los desplazamientos producidos por las deformaciones impuestas en los apoyos (aisladores) y la subestructura. Además, las rigideces horizontales de los aisladores, estribos y pilas influyen en el valor de las fuerzas y desplazamientos debido a las acciones sísmicas, y en el periodo efectivo de vibración del puente, con el que se determinan las aceleraciones sísmicas mediante el uso del espectro de respuesta de cálculo, que es una función no lineal del periodo de vibración.

El procedimiento que se va a seguir en el dimensionamiento es el siguiente:

1. Pre-dimensionamiento de la planta de los aisladores para las cargas verticales máximas en combinaciones no sísmicas según UNE-EN 1337-3.
2. Pre-dimensionamiento del espesor total, T_q , de material elastómero teniendo en cuenta los desplazamientos horizontales debidos a la acción sísmica, calculados mediante el método espectral del modo fundamental, y sin considerar los desplazamientos debidos a las acciones no sísmicas en situación sísmica, ya que en esta fase del cálculo son desconocidos puesto que dependen del dimensionado del aislador.
3. Determinación de los desplazamientos no sísmicos de las combinaciones sísmicas que se utilizan para las comprobaciones de UNE-EN 15129 teniendo en cuenta el pre-dimensionado de las dimensiones en planta del aislador y de T_q que se han pre-dimensionado en los pasos 1 y 2 anteriores. Debe tenerse en cuenta que el valor de T_q influye en la rigidez del apoyo elastomérico, la cual afecta a los desplazamientos no sísmicos. En base a estos desplazamientos, se determinará mediante criterios heurísticos si, con el pre-dimensionamiento de los pasos 1 y 2, las comprobaciones condicionantes son las de la combinación sísmica según UNE-EN 15129, o las de las combinaciones no sísmicas según UNE-EN 1337.
4. En el caso de que las comprobaciones condicionantes que gobiernan el dimensionamiento sean las de UNE-EN 15129, los pasos a seguir serán los siguientes:
 - 4.1. Determinar los desplazamientos sísmicos mediante el método espectral multimodal. Se puede prescindir de este paso si se cumplen las condiciones anteriores para aplicar el método del modo fundamental (criterios de los apartados 7.5.3 y 7.5.4 de UNE-EN 1998-2, o del apartado 6.1 de esta guía), porque los desplazamientos sísmicos con este método ya se habrían calculado en el paso 2. Puede realizarse este paso 4.1 aunque se cumplan las condiciones para aplicar el método del modo fundamental si se quiere refinar el cálculo.
 - 4.2. Comprobaciones de UNE-EN 15129 y UNE-EN 1998-2, lo cual puede implicar la necesidad de realizar ajustes en los dispositivos pre-dimensionados en los pasos 1 y 2 para que se cumpla UNE-EN 15129.
 - 4.3. Comprobaciones de las combinaciones no sísmicas según UNE-EN 1337-3.
5. En el caso de que las comprobaciones condicionantes sean las de UNE-EN 1337-3 (ver apartado 8 de esta guía), los pasos a seguir serán:
 - 5.1. Comprobaciones de UNE-EN 1337-3, lo cual puede implicar la necesidad de realizar ajustes en los dispositivos pre-dimensionados en los pasos 1 y 2 para que se cumpla UNE-EN 1337-3.
 - 5.2. Comprobaciones de las combinaciones sísmicas según UNE-EN 15129 y UNE-EN 1998-2.

Las comprobaciones de las combinaciones no sísmicas de ELU como apoyos elastoméricos según UNE-EN 1337-3 no son objeto de esta guía y por tanto no se incluyen. Estas comprobaciones están ampliamente desarrolladas en la *Guía para el cálculo de apoyos elastoméricos* [18] y en su guía de ejemplo [19].

9.1 Pre-dimensionamiento de los aisladores elastoméricos

De forma aproximada se puede afirmar que cuando el efecto de las acciones sísmicas (desplazamientos y fuerzas horizontales) es del orden de dos a tres veces superior al de las acciones no sísmicas en valor característico, serán más restrictivas las comprobaciones de UNE-EN 15129 que las de UNE-EN 1337-3. Con este criterio heurístico se puede tener una idea de si lo que va a condicionar el dimensionado del apoyo elastomérico empleado también como aislador sísmico son las acciones sísmicas o las no sísmicas. Cuando las sollicitaciones sísmicas son moderadas o grandes, en general, el dimensionamiento de los aisladores elastoméricos LDRB viene condicionado por los requisitos de UNE-EN 15129, por lo que se recomienda abordar el pre-dimensionamiento desde el cálculo sísmico.

Comentario: El criterio heurístico anterior se basa en las siguientes consideraciones.

- El cálculo con UNE-EN 1337-3 se realiza en ELU con las combinaciones no sísmicas para las cuales las acciones desfavorables están mayoradas. En cambio, el cálculo con UNE-EN 15129 se realiza para la combinación sísmica, en la cual las acciones desfavorables no se mayoran, pero se incrementan los efectos de la acción sísmica en los apoyos elastoméricos multiplicándolos por el coeficiente de fiabilidad $\gamma_x = 1,5$.
- La segunda consideración está relacionada con la limitación de deformación tangencial debida al desplazamiento horizontal, ε_q . En UNE-EN 1337-3 se limita la deformación tangencial debida a las combinaciones no sísmicas de ELU a $\varepsilon_{q,d} \leq 1$ (100 %), mientras que, bajo el cumplimiento de UNE-EN 15129, se permiten deformaciones tangenciales de hasta $\varepsilon_{q,max} \leq 2,5$ (250 %).
- La tercera consideración está relacionada con la forma de calcular la deformación tangencial máxima. La norma UNE-EN 1337-3 limita la deformación tangencial máxima, $\varepsilon_{q,d}$, debida a las acciones no sísmicas en ELU a $\varepsilon_{q,d} \leq 1$. Debe recordarse que las deformaciones tangenciales $\varepsilon_{q,d}$ del apartado 5.3.3.3 de UNE-EN 1337-3 se calculan de forma un poco distinta a las deformaciones tangenciales $\varepsilon_{q,d}$ del apartado 7.6.2 de UNE-EN 1998-2, aunque se emplee el mismo nombre (ver apartado 7 de esta guía). Por otra parte, la norma UNE-EN 15129 limita las deformaciones tangenciales máximas totales, $\varepsilon_{q,max}$, debidas a acciones sísmicas y no sísmicas a $\varepsilon_{q,max} \leq 2,5$ (si el LDRB se trata como no sometido a "acciones sísmicas pequeñas", y a $\varepsilon_{q,max} \leq 2$ en caso contrario (ver expresión (39)). Debe señalarse que la $\varepsilon_{q,d}$ de UNE-EN 1337-3 y la $\varepsilon_{q,max}$ de UNE-EN 15129 son también distintas no sólo por las acciones que se consideran en cada caso sino también por la forma de calcularlas. $\varepsilon_{q,d}$ se obtiene con el desplazamiento $v_{xy,d}$ obtenido sumando vectorialmente los desplazamientos en la dirección horizontal principal X , v_{xd} , y en la dirección Y , v_{yd} , es decir $v_{xy,d} = (v_{x,d}^2 + v_{y,d}^2)^{0,5}$. Sin embargo, $\varepsilon_{q,max}$ se calcula con el desplazamiento máximo en cada dirección principal y se comprueba por separado para cada dirección principal, sin sumarlas vectorialmente.

Otro aspecto importante a tener en cuenta a la hora de abordar el pre-dimensionamiento es el objetivo final del cálculo de los aisladores sísmicos. Se pueden hacer dos planteamientos:

- Proyectar unos aisladores elastoméricos que cumplan de forma estricta tanto con los requerimientos no sísmicos como con los requerimientos sísmicos para poder utilizarlos como aisladores sísmicos, sin preocuparse de cuánto se reducen con ellos los esfuerzos sobre la subestructura, o;
- proyectar los aisladores elastoméricos para que además de cumplir los requisitos que permitan utilizarlos como aisladores sísmicos, reduzcan los esfuerzos debidos al sismo sobre la subestructura a unos niveles deseados.

9.1.1 Pre-dimensionamiento del área en planta de los aisladores elastoméricos según UNE-EN 1337-3

El primer paso es establecer el área mínima necesaria en planta para resistir las mayores cargas verticales, correspondientes a las de combinaciones no sísmicas, según UNE-EN 1337-3. El pre-dimensionamiento del área necesaria para los apoyos del puente objeto de ejemplo en esta guía se desarrolla en detalle en la *Guía para el cálculo de apoyos elastoméricos. Ejemplo de aplicación* [19].

En general, se buscará una geometría que permita cumplir con el criterio de tensión máxima de compresión en ELU. La norma UNE-EN 1337-3 limita la tensión máxima de compresión de los apoyos en ELU mediante la verificación de la condición de estabilidad a pandeo en situación no sísmica expuesta en su apartado 5.3.3.6. Tal y como se justifica en la *Guía para el cálculo de apoyos elastoméricos según la UNE-EN 1337-3* [18], esta condición es equivalente a la limitación a 15 MPa, para combinaciones de Estado Límite de Servicio, que definían las *Recomendaciones de 1982* [22]. Así, para el pre-dimensionamiento de los aisladores, se limitará la tensión de compresión a 20–25 MPa, en ELU (equivalente a 14–18 MPa en ELS).

Comentario: El cumplimiento de la tensión mínima bajo cargas permanentes a 2 MPa para la verificación del apartado 5.3.3.6 de UNE-EN 1337-3 no es de aplicación para el cálculo de aisladores ya que, el apartado 8.1 de UNE-EN 15129 indica que los aisladores elastoméricos deben anclarse frente a cortantes horizontales, admitiendo únicamente hasta un 25 % de resistencia por fricción frente a la menor carga vertical en situación sísmica teniendo en cuenta la componente vertical del sismo mediante un análisis dinámico (e.g. modal espectral).

9.1.1.1 Pre-dimensionamiento en planta de los aisladores de estribos

En la tabla 21 (con información tomada de la *Guía para el cálculo de apoyos elastoméricos. Ejemplo de aplicación* [19]) se recogen las reacciones verticales máximas y mínimas en ELU de las combinaciones no sísmicas en los aisladores de estribos, $F_{z,d,ELU,max}$ y $F_{z,d,ELU,min}$, así

como el área mínima A'_{min} , necesaria para resistir la reacción vertical máxima con una tensión de 20 MPa. Nótese en dicha tabla que la combinación de cálculo que proporciona la máxima o mínima reacción en uno de los dos aisladores de estribo suele producir una reacción pequeña o de signo contrario en el otro. Esto es debido a que, en situación no sísmica, las reacciones máximas de los estribos provienen de configuraciones de sobrecarga que producen máximo momento torsor en el tablero.

Tabla 21 Reacciones verticales en los apoyos de estribos, debidas a cargas permanentes, sobrecarga vehicular, gradiente térmico y viento vertical en ELU

Combinación	$F_{z,d,ELU,1}$ [kN] ^{a b}	$F_{z,d,ELU,2}$ [kN] ^{a b}	$A'_{min} = \frac{F_{z,d,max}}{20\text{MPa}}$ [mm ²] ^c
$F_{z,d,ELU,max}^a$	2.630	220	131.500
$F_{z,d,ELU,min}^a$	1.354	-846	

^a Fuerza vertical: valores positivos de compresión; valores negativos de tracción o levantamiento.

^b $F_{z,d,ELU,1}$ fuerza vertical en aislador 1; $F_{z,d,ELU,2}$ fuerza vertical en aislador 2.

^c Área mínima supuesta tensión máxima de 20 MPa (se podría alcanzar hasta 25 MPa).

Un aislador de 400 x 500, como el utilizado como apoyo en la *Guía para el cálculo de apoyos elastoméricos. Ejemplo de aplicación* [19], proporciona un área efectiva de 191.100 mm², que es mayor que A'_{min} , y produciría una tensión media frente a la máxima sollicitación vertical de $\sigma_m = 13,57 < 20$ MPa, que se considera un valor razonable.

En cuanto a la mínima sollicitación vertical, como se puede observar en la tabla 21, se obtienen reacciones negativas en uno de los apoyos, es decir, puede haber levantamiento del tablero en uno de los aisladores en presencia de las sobrecargas. Por ello, se coloca un sistema de apoyos invertidos que, para las situaciones descritas, funciona como tope anti-levantamiento, comprimiendo los apoyos superiores y permitiendo el movimiento libre del tablero tanto en la dirección longitudinal como transversal, según se muestra en la figura 23. El dimensionamiento de los apoyos anti-levantamiento se desarrolla en detalle en *Guía para el cálculo de apoyos elastoméricos. Ejemplo de aplicación* [19], y en esta guía únicamente se reseña a nivel conceptual. Este tope anti-levantamiento, permite que el aislador no sufra tracciones en ningún momento, por lo que, en el puente objeto de ejemplo, la combinación II (ver apartados 4.3.2 y 4.3.3 de esta guía) podría calcularse sin tracciones (con carga vertical nula).

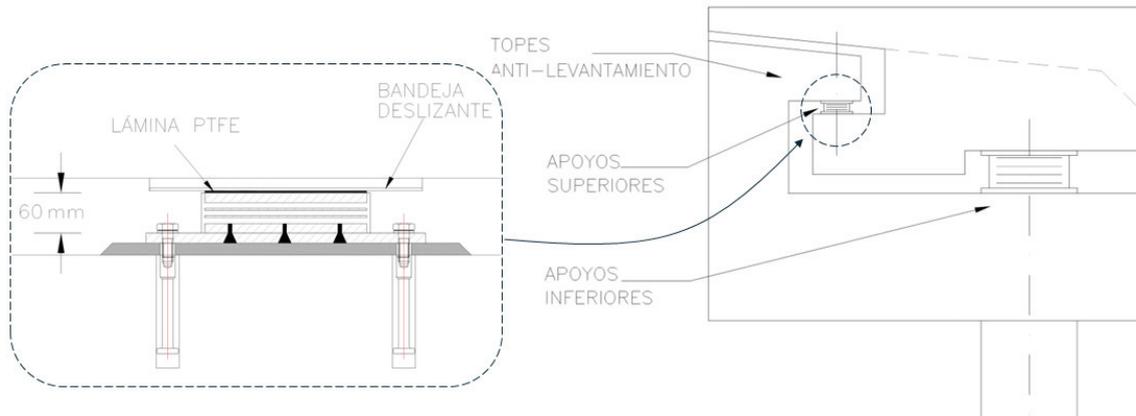


Figura 23 Sistema de apoyos invertidos (topes anti-levantamiento)

Con carácter didáctico, en la presente guía se van a realizar las comprobaciones como si no hubiera tope anti-levantamiento, evaluando la capacidad de resistir tracciones del aislador elastomérico en base al apartado 8.2.1.2.7 de UNE-EN 15129. Por ello, los aisladores de estribos se anclarán a la estructura mediante una fijación normalizada según el apartado 8.2.3.2 de UNE-EN 15129.

9.1.1.2 Pre-dimensionamiento en planta de los aisladores de pilas

En la tabla 22 (con información tomada de la *Guía para el cálculo de apoyos elastoméricos. Ejemplo de aplicación* [19]) se recogen las reacciones verticales máximas y mínimas en ELU en los aisladores de pilas, así como el área mínima A'_{min} , necesaria para resistir la reacción vertical máxima con una tensión de 20 MPa.

Tabla 22 Reacciones verticales en los apoyos de pilas, únicamente debido a cargas permanentes, sobrecarga vehicular, gradiente térmico y viento vertical

Combinación	$F_{z,d,ELU}$ [kN] ^a	$A'_{min} = \frac{F_{z,d,max}}{20 \text{ MPa}}$ [mm ²] ^b
$F_{z,d,ELU,max}$ ^c	12.872	643.600
$F_{z,d,ELU,min}$ ^c	5.041	

^a Fuerza vertical: valores positivos de compresión; valores negativos de levantamiento.

^b Área mínima supuesta tensión máxima de 20 MPa (se podría alcanzar hasta 25 MPa).

^c Fuerza vertical: valores positivos de compresión; valores negativos de tracción o levantamiento.

Un aislador circular de 900 mm de diámetro, como el utilizado como apoyo en la *Guía para el cálculo de apoyos elastoméricos. Ejemplo de aplicación* [19], proporciona un área efectiva de 622.114 mm² que es menor que A'_{min} , y produciría una tensión media frente a la máxima sollicitación vertical de $\sigma_m = 20,69$ MPa que, pese a superar los 20 MPa, sigue por debajo de 25 MPa.

Dado que en los apoyos de pila no son esperables reacciones de tracción, se plantea una fijación mecánica no normalizada mediante aislador empotrado en hueco mecanizado en las placas de anclaje, según el apartado 8.2.3.2 de UNE-EN 15129.

9.1.2 Pre-dimensionamiento del espesor total de material elastómero, T_q , empleando únicamente los desplazamientos sísmicos calculados con el método del modo fundamental

El requisito que suele condicionar generalmente el dimensionado es la limitación de deformación tangencial máxima frente a las acciones horizontales (sísmicas y no sísmicas en situación sísmica), $\varepsilon_{q,max}$, del apartado 8.2.3.4.1 de UNE-EN 15129 (expresión (39)), que se obtiene a partir del desplazamiento máximo, d_{max} , que es la suma del desplazamiento sísmico de cálculo del aislador en la dirección principal crítica, d_{bd} , incrementado por coeficiente de mayoración por fiabilidad, $\gamma_x d_{bd}$, y el desplazamiento en la misma dirección causado por las acciones no sísmicas, d_G , que se describen en el apartado 8.1 de UNE-EN 15129 (expresión (37) de esta guía). En la fase de pre-dimensionado no se conocen todavía los valores de d_G , ya que dependen del dimensionado de los apoyos elastoméricos, por lo que hay que hacer una estimación inicial de las tensiones tangenciales en los aisladores sólo con $\gamma_x d_{bd}$. Por conveniencia, se define en esta guía la deformación tangencial debida sólo a $\gamma_x d_{bd}$ como $\varepsilon_q = \gamma_x d_{bd} / T_q$.

El pre-dimensionado se realiza analizando el valor de $\varepsilon_q = \gamma_x d_{bd} / T_q$ en la dirección principal más desfavorable. En este ejemplo la dirección X va a ser más desfavorable, ya que el desplazamiento $d_{G,x}$ va a ser previsiblemente superior al $d_{G,y}$, por efecto del término y las deformaciones diferidas. Sin embargo, de cara al pre-dimensionamiento, donde aún no se está teniendo en cuenta d_G , en el puente de este ejemplo es realmente indiferente la dirección a elegir para pre-dimensionar, ya que el puente es simétrico según el eje longitudinal (X), y con muy pequeñas excentricidades entre el centro de masas y el centro de rigidez del tablero en la dirección transversal (eje Y). Por tanto, las deformaciones y fuerzas cortantes en dirección X cuando se aplica la acción sísmica $A_{Ed,x}$ son prácticamente iguales a las deformaciones y fuerzas cortantes en dirección Y cuando se aplica $A_{Ed,y}$. Si las excentricidades entre el centro de masas y el centro de rigidez del tablero en la dirección principal Y hubiesen sido importantes (puente curvo, puente esviado o pilas de altura significativamente diferente), podría haber sido apropiado pre-dimensionar con las deformaciones ε_q en Y (o con ambas direcciones para determinar la más desfavorable), ya que los giros de eje vertical (torsión) del tablero incrementarían los desplazamientos de los aisladores en la dirección Y . Por otra parte, el pre-dimensionado se realiza iterando con el espesor total, T_q , del elastómero de cada aislador.

Para calcular de forma sencilla en fase de pre-dimensionamiento los valores de $\gamma_x d_{bd}$ y ε_q , es aconsejable utilizar el método del modo fundamental (ver apartado 6.1 de esta guía), siguiendo el procedimiento ya empleado en el apartado 8 de esta guía, y que es el que se emplea en el pre-dimensionamiento de este apartado 9.1.2. Además, incluso si se realiza el análisis por el método multimodal, el cálculo por el método del modo fundamental siempre hay que realizarlo igualmente para establecer un límite inferior, según indica el apartado 7.5.5 de UNE-EN 1998-2.

Teniendo en cuenta la rigidez de la subestructura (ver apartado 5.5 de esta guía) y las masas movilizadas por la acción sísmica (ver apartado 5.6 de esta guía) se realiza el análisis sísmico iterando con el espesor total, T_q , de material elastómero de cada aislador. Este análisis se realiza con el valor nominal de las propiedades de los aisladores teniendo en cuenta, de forma aproximada, que los resultados con las propiedades UBDP suelen variar en torno al 20 % respecto de las propiedades nominales (se incrementan las fuerzas y disminuyen los desplazamientos); y con las propiedades LBDP suelen variar en torno al 10 % respecto de las propiedades nominales (disminuyen las fuerzas y aumentan los desplazamientos).

Comentario: en general, el dimensionamiento de la subestructura vendrá condicionado por el cálculo con propiedades UBDP, que da mayores fuerzas, y el dimensionamiento de los aisladores estará condicionado por las propiedades LBDP, que conduce a los mayores desplazamientos y deformaciones tangenciales. En este sentido, puede ser tentador realizar el pre-dimensionamiento de los aisladores directamente con propiedades LBDP, sin embargo, con ello se pierde en parte la noción del orden de magnitud de los esfuerzos que van a condicionar el dimensionado de la subestructura y que son indicativos de la eficiencia del sistema de aislamiento sísmico. Esto último es importante porque la estrategia de proyecto del sistema de aislamiento sísmico no tiene por qué ser necesariamente minimizar las dimensiones de los aisladores, sino que puede buscar minimizar o reducir las fuerzas en pilas y estribos.

Los valores del módulo de elasticidad transversal, G , que se adoptan para las propiedades DP, y que se resumen a continuación:

$$DP: G = \alpha G_g = 1,25 \cdot 0,9 = 1,125 \text{ MPa}$$

El procedimiento de aproximación iterando con el valor de T_q parte del correspondiente a unos apoyos elastoméricos dimensionados de forma estricta según UNE-EN 1337-3 (caso contemplado en el apartado 8 de esta guía, en adelante denominada iteración 0). Se muestran a continuación, en la tabla 23, los resultados de cada una de las iteraciones, marcando en **verde** los valores que cambian respecto de la iteración anterior.

Tabla 23 Iteraciones para pre-dimensionar T_q empleando las deformaciones en una dirección principal y las propiedades nominales (DP) del elastómero

Aislador	Iteración 0		Iteración 1		Iteración 2		Iteración 3	
	Estribo	Pila	Estribo	Pila	Estribo	Pila	Estribo	Pila
T_q [mm]	84	100	120	100	120	200	130	220
$a \times b$ ó D [mm]	400 x 500	900	400 x 500	900	400 x 500	900	500 x 500	900
K_b ($K_{b,eff}$) [kN/m]	2.679	7.157	1.875	7.157	1.875	3.579	2.163	3.253
V_{bd}^a [kN]	446	784	341	857	354	536	405	492
d_{bd}^b [mm]	166	110	182	120	187	150	187	151
$\gamma_x d_{bd}^b$ [mm]	249	165	273	180	281	225	281	227
ε_q	2,96 (296 %)	1,65 (165 %)	2,27 (227 %)	1,80 (180 %)	2,34 (234 %)	1,12 (112 %)	2,16 (216 %)	1,03 (107 %)
T_{eff} [s]	1,78		1,94		2,19	2,19	2,13	2,13
V_{cd}^c [kN]	3.332		3.048		2.475		2.593	
d_{cd} [mm]	166		182		187		187	

^a V_{bd} es la fuerza sísmica horizontal de cálculo en cada aislador en la dirección principal más desfavorable. En el puente de este ejemplo: $V_{bd} \approx V_{bd,x} \approx V_{bd,y}$.

^b d_{bd} y $\gamma_x d_{bd}$ son el desplazamiento sísmico de cálculo y el mayorado por el coeficiente de fiabilidad, en la dirección principal más desfavorable. En el puente de este ejemplo: $d_{bd} \approx d_{bd,x} \approx d_{bd,y}$ y $\gamma_x d_{bd} \approx \gamma_x d_{bd,x} \approx \gamma_x d_{bd,y}$.

^c V_{cd} es el cortante basal sísmico del puente (sin mayorar por γ_x) en la dirección principal. En el puente de este ejemplo: $V_{cd} \approx V_{cd,x} \approx V_{cd,y}$.

Iteración 0: situación de partida de dimensionamiento estricto de los aisladores como apoyos elastoméricos según UNE-EN 1337-3. Se observa que las deformaciones tangenciales en los estribos, en la dirección principal, considerando solo el desplazamiento sísmico de cálculo mayorado, $\gamma_x d_{bd}$, son excesivas ($\varepsilon_q = 2,96 > 2,50$), tal y como ya se vio en el apartado 8 de esta guía.

Iteración 1: se incrementa el espesor total de material elastómero, T_q , en los estribos, que pasa de 84 a 120 mm, logrando una reducción satisfactoria de las tensiones tangenciales en el aislador. En contrapartida, las pilas asumen una mayor fuerza horizontal $V_{bd,P}$, lo cual incrementa sus sollicitaciones frente a sismo en un 9,3 % respecto de la Iteración 0, lo cual aumenta los esfuerzos en las pilas. Es importante señalar que V_{bd} no son los cortantes máximos para los cuales hay que verificar los estribos o las pilas ya que no se han calculado para los desplazamientos mayorados por γ_x ni incluyen la contribución de las acciones no sísmicas.

Iteración 2: para no aumentar los esfuerzos en las pilas, se incrementa también el espesor total de material elastómero, T_q , en las mismas, que pasa de 100 a 200 mm. Con ello se disminuye considerablemente la rigidez horizontal total del puente, incrementándose el periodo efectivo, T_{eff} , y reduciendo el cortante basal sísmico del puente, V_{cd} , un 25,7 % respecto de la Iteración 0, y la fuerza horizontal en las pilas, $V_{bd,P}$, un 31,6 %. Esta reducción del cortante basal es debida a la disminución de la aceleración espectral que provoca el aumento del periodo efectivo, ya que el amortiguamiento efectivo se mantiene constante en el 5 % (en aisladores LDRB $\xi_{eff,b} \leq 6 \%$). Además, los desplazamientos en las juntas del tablero debido a la acción sísmica (desplazamiento $d_{bd,E}$ de los aisladores de estribos) se incrementan sólo en 21 mm (+12,7 %) respecto de la iteración 0, y 5 mm (+2,7 %) respecto de la iteración 1. Con esta solución, las deformaciones tangenciales en los estribos en la dirección principal para el desplazamiento sísmico de cálculo mayorado, $\gamma_x d_{bd}$, y sin incluir las deformaciones horizontales debidas a las acciones no sísmicas, se quedan muy cerca del máximo permitido en la dirección principal ($\varepsilon_q = 2,34 < 2,5$). Por ello, teniendo en cuenta que en el pre-dimensionamiento no se está considerando la deformación debida al desplazamiento por las acciones no sísmicas en combinación sísmica, d_G , ni tampoco las propiedades LBDP de los materiales, que previsiblemente darán lugar a una mayor deformación tangencial, es necesario ajustar las dimensiones de los aisladores de estribos en una 3.ª iteración para dejar una cierta holgura.

Iteración 3: con el fin de no incrementar los esfuerzos en las pilas ni los desplazamientos en las juntas del tablero, se incrementa el espesor total de material elastómero, T_q , en estribos hasta los 130 mm (disminuye K_b), compensándolo parcialmente con un incremento de las dimensiones en planta de dichos aisladores (aumenta K_b) que pasan de dimensiones 400 x 500 a 500 x 500. Aumentando también a 230 mm el espesor total de material elastómero, T_q , en los aisladores de las pilas, se logra compensar el pequeño incremento de rigidez global por el cambio en los aisladores de estribo, a la vez que se reducen aún más los esfuerzos horizontales en las pilas. Con esta solución, dado que T_q aumenta, se logra una menor deformación tangencial en los aisladores de estribos en la dirección principal calculados sólo con los desplazamientos sísmicos mayorados por γ_x ($\varepsilon_q = 2,16 < 2,5$). Así mismo se consigue una reducción del cortante basal sísmico del puente, V_{cd} , respecto de la iteración 0, del 22 %, con una reducción de V_{bd} en las pilas ($V_{bd,P}$) del 37,2 %.

Se muestran en la figura 24 los resultados de las iteraciones en términos de aceleraciones espectrales adimensionales, S_a/g , y en la figura 25 en términos desplazamientos espectrales $d_{cd} = S_d = S_a T_{eff}^2 / (4\pi^2)$ en el centro de rigidez del tablero. Se aprecia que, al disminuir la rigidez efectiva de la estructura, K_{eff} , se incrementa el periodo de vibración, T_{eff} , disminuye la aceleración espectral, S_a (en la misma proporción que lo hace el cortante basal sísmico del puente, V_{cd}), y aumenta el desplazamiento del tablero.

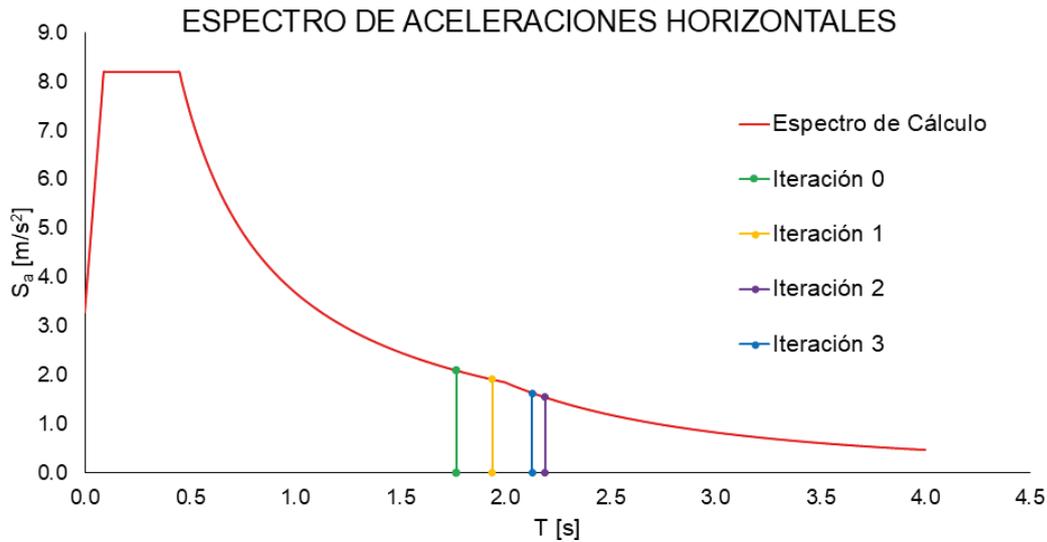


Figura 24 Procedimiento iterativo de pre-dimensionamiento representado en el espectro de aceleraciones de cálculo adimensional

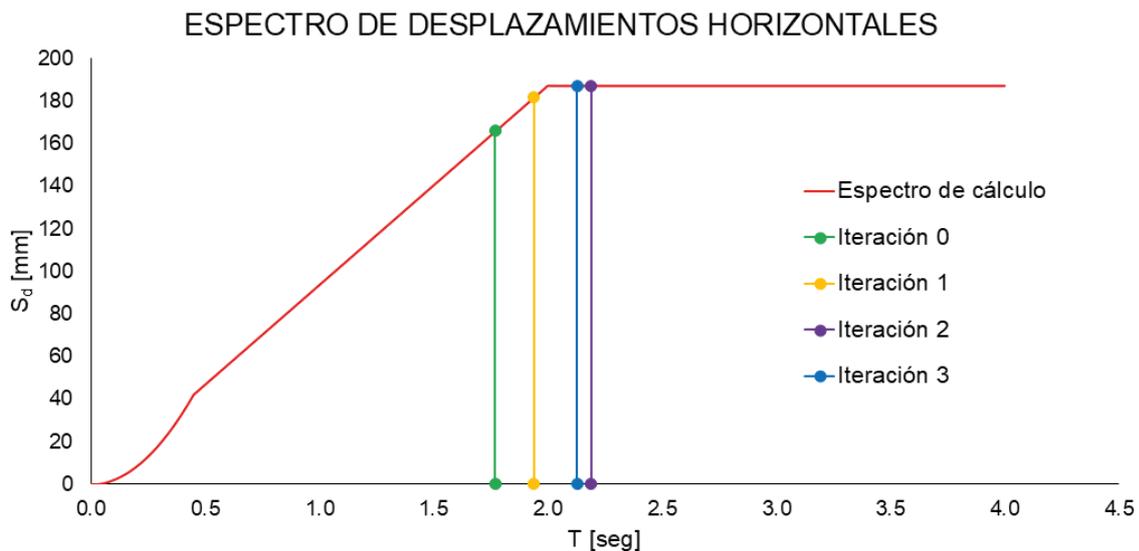


Figura 25 Procedimiento iterativo de pre-dimensionamiento representado en el espectro de desplazamientos de cálculo

El pre-dimensionamiento de los aisladores elastoméricos en los estribos quedaría así:

- Espesor total material elastómero: $T_q = 130 \text{ mm}$
- Área total en planta: $a \times b = 500 \times 500 = 250.000 \text{ mm}^2$
- Área efectiva: $A' = a' \times b' = 490 \times 490 = 240.100 \text{ mm}^2$

El pre-dimensionamiento de los aisladores elastoméricos en las pilas quedaría así:

- Espesor total del material elastómero: $T_q = 220 \text{ mm}$

- Área total en planta: $\pi D^2/4 = \pi \cdot 900^2/4 = 200.000 \text{ mm}^2$
- Área efectiva: $A' = \pi D'^2/4 = \pi \cdot 890^2/4 = 622.114 \text{ mm}^2$

En las tablas 24 y 25 se incluyen los valores de las rigideces efectivas, K_b (o $K_{b,eff}$), las fuerzas y desplazamientos horizontales de cálculo, V_{bd} y d_{bd} , y las deformaciones tangenciales ε_q debidas únicamente a la acción sísmica mayorada por γ_x , obtenidos con los aisladores pre-dimensionados y considerando las propiedades UBDP y LBDP, mediante el método del modo fundamental. Se incluyen también, por conveniencia, los valores DP.

Tabla 24 Estribos. Deformación tangencial de los aisladores frente a sollicitación sísmica con propiedades DP, UBD y LBDP

Propiedades	K_b [kN/m]	V_{bd}^a [kN]	d_{bd}^b [mm]	$\gamma_x \cdot d_{bd}^b$ [mm]	ε_q
DP	2.163	405	187	281	2,16
UBDP	3.842	589	153	230	1,77
LBDP	1.488	280	187	282	2,17

^a V_{bd} es la fuerza sísmica horizontal de cálculo en cada aislador en la dirección principal más desfavorable. En el puente de este ejemplo: $V_{bd} \approx V_{bd,x} \approx V_{bd,y}$.

^b d_{bd} y $\gamma_x d_{bd}$ son el desplazamiento sísmico de cálculo y el mayorado por el coeficiente de fiabilidad, en la dirección principal más desfavorable. En el puente de este ejemplo: $d_{bd} \approx d_{bd,x} \approx d_{bd,y}$ y $\gamma_x d_{bd} \approx \gamma_x d_{bd,x} \approx \gamma_x d_{bd,y}$.

Tabla 25 Pilas. Deformación tangencial de los aisladores frente a sollicitación sísmica con propiedades DP, UBD y LBDP

Propiedades	K_b [kN/m]	V_{bd}^a [kN]	d_{bd}^b [mm]	$\gamma_x \cdot d_{bd}^b$ [mm]	ε_q
DP	3.253	492	151	227	1,03
UBDP	4.075	625	108	162	0,74
LBDP	2.238	362	162	243	1,10

^a V_{bd} es la fuerza sísmica horizontal de cálculo en cada aislador en la dirección principal más desfavorable. En el puente de este ejemplo: $V_{bd} \approx V_{bd,x} \approx V_{bd,y}$.

^b d_{bd} y $\gamma_x d_{bd}$ son el desplazamiento sísmico de cálculo y el mayorado por el coeficiente de fiabilidad, en la dirección principal más desfavorable. En el puente de este ejemplo: $d_{bd} \approx d_{bd,x} \approx d_{bd,y}$ y $\gamma_x d_{bd} \approx \gamma_x d_{bd,x} \approx \gamma_x d_{bd,y}$.

Se incluyen a continuación en la tabla 26 los valores del periodo efectivo, T_{eff} , del cortante basal total y del desplazamiento del centro de rigidez del sistema de aislamiento, d_{cd} , obtenidos con los aisladores pre-dimensionados y considerando las propiedades DP, UBDP y LBDP, mediante el método del modo fundamental. Se establece también la comparación en términos de d_{cd} entre los resultados obtenidos con UBDP y LBDP y los de las propiedades nominales (DP).

Tabla 26 Cortante basal total de la estructura, V_{cd} , y desplazamiento sísmico de cálculo del centro de rigidez del tablero, d_{cd} , con propiedades DP, UBDP y LBDP

Propiedades	T_{eff} [s]	V_{cd} [kN]	d_{cd} [mm]
DP	1,78	2.593	187
UBDP	1,64	3.587	153
LBDP	2,54	1.838	187

Nótese que a partir de un valor del periodo efectivo de $T_{eff} = T_D = 2,00$ s, se inicia el tramo de desplazamientos constantes, por lo que la respuesta en términos de desplazamientos en el centro de rigidez del sistema de aislamiento ($d_{cd,DP} \equiv d_{cd,LB}$).

9.2 Respuesta de los aisladores frente a las acciones no sísmicas en situación sísmica y tensiones tangenciales máximas totales, $\mathcal{E}_{q,max}$

Los desplazamientos debidos a las acciones no sísmicas en situación sísmica pueden tener un impacto no despreciable en las comprobaciones según UNE-EN 15129. Estos desplazamientos se calculan teniendo en cuenta las rigideces de los aisladores elastoméricos, K_b (o $K_{b,eff}$), que son función de la geometría del elastómero y del módulo de elasticidad transversal de dicho material, G , y por tanto sensible a la variabilidad de las propiedades (DP, UBDP, LBDP). Para ello, se sigue un procedimiento similar al descrito en el apartado 8.2 de esta guía. Se incluyen a continuación, en la tabla 27, los valores de rigidez efectiva de los aisladores pre-dimensionados en el apartado 9.1, empleando las propiedades nominales, K_b , y los valores de límite superior, $K_{b,UB}$, y de límite inferior, $K_{b,LB}$, de las propiedades del elastómero.

Tabla 27 Características y propiedades en situación sísmica de los aisladores sísmicos dimensionados según UNE-EN 15129

Aisladores elastoméricos		Dimensiones en planta [mm x mm]	Altura total de elastómero, T_q [mm]	K_b [kN/m]	$K_{b,UB}$ [kN/m]	$K_{b,LB}$ [kN/m]
Estribos	Dos aisladores rectangulares	500 x 500	130	2.163	3.842	1.488
Pilas	Un aislador circular	900	220	3.523	4.075	2.238

Con estas propiedades se calculan las fuerzas cortantes, V_G , y los desplazamientos no sísmicos, d_G , en los apoyos elastoméricos en cada dirección horizontal principal X e Y , que serán utilizados posteriormente en las comprobaciones de UNE-EN 15129, y que vienen dados por las expresiones (43) y (44).

Como en el puente del ejemplo hay simetría en planta y en alzado, y las pilas son mono-fuste de sección circular, la respuesta sísmica es la misma en la dirección longitudinal, X , que, en transversal, Y . Como además el pretensado, la fluencia, la retracción y el térmico actúan en la dirección longitudinal del tablero, los desplazamientos y fuerzas en apoyos de las acciones no sísmicas en situación sísmica en la dirección transversal son prácticamente nulos ($d_{G,y,E} = 0, V_{G,y,E} = 0, d_{G,y,P} = 0, V_{G,y,P} = 0$). Por todo ello, los valores de las acciones no sísmicas en situación sísmica más desfavorables son los de la hipótesis III de carga definida en los apartados 4.3.2 y 4.3.3 de esta guía. Esta es la hipótesis de situación sísmica que da lugar al máximo desplazamiento horizontal longitudinal con la máxima compresión concomitante en los aisladores, ya que en ella las mayores deformaciones de las acciones no sísmicas se suman a las de la acción sísmica. En los estribos, esta situación se da a largo plazo (t_{∞}), con la máxima carga permanente, un térmico uniforme de contracción con un gradiente térmico positivo concomitante, y la componente sísmica longitudinal, $A_{Ed,x}$, como dirección principal, tal y como se muestra de forma esquemática en la la figura 9. En los aisladores de las pilas, la hipótesis III de máximo desplazamiento horizontal con la máxima compresión concomitante se produce a largo plazo (t_{∞}), con la máxima carga permanente, un térmico uniforme de contracción con un gradiente térmico negativo concomitante, y la componente sísmica longitudinal, $A_{Ed,x}$, como dirección principal, tal y como se muestra de forma esquemática en la la figura 13.

Los resultados de d_G y V_G en la dirección principal longitudinal, X , empleando los valores nominales de las propiedades del elastómero se muestran en las tablas 28 y 29 para los estribos y para las pilas, respectivamente.

Tabla 28 Estribos. Desplazamientos y fuerzas horizontales no sísmicas en la dirección principal longitudinal (X) calculados con DP

Acción	d_i [mm]	V_i [kN]
d_{CP} / V_{CP} : Cargas permanentes máximas ^a	0,7	1,5
d_P / V_P : Pretensado (acortamiento elástico)	6,2	13,4
d_{∞} / V_{∞} : Diferidas (fluencia y retracción)	21,4	46,3
d_T / V_T : Térmico de contracción (acortamiento) ^b	13,3	28,8
$d_G = d_{CP} + d_P + d_{\infty} + 0,5 d_T$ $V_G = V_{CP} + V_P + V_{\infty} + 0,5 V_T$	35	75,6

^a Se demuestran despreciables los desplazamientos y fuerzas horizontales frente a la acción vertical de las cargas permanentes. En adelante no se considerarán.

^b Los valores de d_T (y V_T) incluidos en la tabla se corresponden con el térmico de contracción, ya que el de dilatación, pese a ser mayor, produce deformaciones en sentido contrario a d_{CP} , d_P y d_{∞} .

Tabla 29 Pilas. Desplazamientos y fuerzas horizontales no sísmicas en la dirección principal longitudinal (X) calculados con DP

Acción	d_i [mm]	V_i [kN]
d_{CP} / V_{CP} : Cargas permanentes máximas	2,45	8,6
d_P / V_P : Pretensado (acortamiento elástico)	2,5	8,8
d_{∞} / V_{∞} : Diferidas (fluencia y retracción)	6,7	23,6
d_T / V_T : Térmico de contracción (acortamiento) ^b	5,3	18,7
$d_G = d_{CP} + d_P + d_{\infty} + 0,5d_T$ $V_G = V_{CP} + V_P + V_{\infty} + 0,5V_T$	14,3	50,4

^b Los valores de d_T (y V_T) incluidos en la tabla se corresponden con el térmico de contracción, ya que el de dilatación, pese a ser mayor, produce deformaciones en sentido contrario a d_{CP} , d_P y d_{∞} .

Se observa que los desplazamientos no sísmicos de los apoyos elastoméricos pre-dimensionados del apartado 9.1 anterior no difieren significativamente de los obtenidos con los apoyos dimensionados estrictamente según UNE-EN 1337-3 en el apartado 8 de esta guía.

Los resultados de los desplazamientos y fuerzas horizontales no sísmicos de situación sísmica en la dirección principal longitudinal (X) se muestran resumidas en la tabla 30, donde se han incluido por conveniencia los correspondientes a las propiedades nominales de las tablas anteriores. Se observa que los valores para UBDP y LBDP son muy próximos a los obtenidos con DP.

Tabla 30 Desplazamientos y fuerzas horizontales no sísmicas en la dirección principal longitudinal (X) calculados con UBDP y LBDP

Aisladores elastoméricos	DP		UBDP		LBDP	
	$d_{G,x}$ [mm]	$V_{G,x}$ [kN]	$d_{G,UB,x}$ [mm]	$V_{G,UB,x}$ [kN]	$d_{G,LB,x}$ [mm]	$V_{G,LB,x}$ [kN]
Estribos	35,0	75,6	34,9	134,1	35,1	52,2
Pilas	14,3	50,4	12,5	50,9	15,5	34,7

Los resultados de los desplazamientos y fuerzas horizontales no sísmicos de situación sísmica en la dirección principal longitudinal (Y) se muestran resumidas en la tabla 31, y son todos de valor nulo porque el pretensado, la fluencia, la retracción y el térmico actúan solo en la dirección longitudinal del tablero.

Tabla 31 Desplazamientos y fuerzas horizontales no sísmicas en la dirección principal longitudinal (Y) calculados con UBDP y LBDP

Aisladores elastoméricos	DP		UBDP		LBDP	
	$d_{G,y}$ [mm]	$V_{G,y}$ [kN]	$d_{G,UB,y}$ [mm]	$V_{G,UB,y}$ [kN]	$d_{G,LB,y}$ [mm]	$V_{G,LB,y}$ [kN]
Estribos	0	0	0	0	0	0
Pilas	0	0	0	0	0	0

Por otra parte, al ser la relación $d_{bd}/d_G > 3$, se puede afirmar que el dimensionamiento de los aisladores sísmicos vendrá condicionado por el cumplimiento de UNE-EN 15129. Los valores de desplazamientos y cortantes no sísmicos en combinación sísmica se calcularon también para las propiedades UBDP y LBDP, con los valores de las acciones no sísmicas en combinación sísmica de la hipótesis III de la 4.3 de esta guía. Los resultados se muestran en la tabla 25 donde se han incluido por conveniencia los correspondientes a las propiedades nominales. Se observa que los valores para UBDP y LBDP son muy próximos a los obtenidos con DP.

9.3 Viabilidad de los aisladores elastoméricos con propiedades DP, UBDP y LBDP

Se muestra a continuación, en las tablas 32 y 33, el resumen de obtención de la deformación tangencial por cortante, $\varepsilon_{q,max}$, correspondiente al desplazamiento horizontal máximo, d_{max} , en ambas direcciones principales X e Y , según las expresiones (2) y (39), que toman los valores de d_{bd} y d_G , de las tablas 24, 25, 30 y 31:

Tabla 32 Estribos. Deformación tangencial máxima $\varepsilon_{q,max}$ correspondiente al desplazamiento lateral d_{max} en cada dirección principal con DP, UBDP y LBDP

Propiedades	V_{bd} [kN]	$d_{bd,x} = d_{bd,y}$ [mm]	d_{max} [mm]		$\varepsilon_{q,max}$		
DP	405	187	$d_{max,x}$	315,5	$\varepsilon_{q,max,x}$	2,427	< 2,5
			$d_{max,y}$	280,5	$\varepsilon_{q,max,y}$	2,158	< 2,5
UBDP	589	153	$d_{max,x}$	264,4	$\varepsilon_{q,max,x}$	2,034	< 2,5
			$d_{max,y}$	229,5	$\varepsilon_{q,max,y}$	1,765	< 2,5
LBDP	280	187	$d_{max,x}$	315,6	$\varepsilon_{q,max,x}$	2,428	< 2,5
			$d_{max,y}$	280,5	$\varepsilon_{q,max,y}$	2,158	< 2,5

Tabla 33 Pilas. Deformación tangencial máxima $\varepsilon_{q,max}$ correspondiente al desplazamiento lateral d_{max} en cada dirección principal con DP, UBDP y LBDP

Propiedades	V_{bd} [kN]	$d_{bd,x} = d_{bd,y}$ [mm]	d_{max} [mm]		$\varepsilon_{q,max}$		
DP	492	151	$d_{max,x}$	240,8	$\varepsilon_{q,max,x}$	1,095	< 2,5
			$d_{max,y}$	226,5	$\varepsilon_{q,max,y}$	1,030	< 2,5
UBDP	625	108	$d_{max,x}$	174,5	$\varepsilon_{q,max,x}$	0,793	< 2,5
			$d_{max,y}$	162,0	$\varepsilon_{q,max,y}$	0,736	< 2,5
LBDP	362	162	$d_{max,x}$	258,5	$\varepsilon_{q,max,x}$	1,175	< 2,5
			$d_{max,y}$	243,0	$\varepsilon_{q,max,y}$	1,105	< 2,5

La deformación tangencial máxima frente al desplazamiento lateral, $\varepsilon_{q,max} = d_{max}/T_q$, es habitualmente el criterio dimensionante de los aisladores elastoméricos. Esta deformación tangencial se compara con el valor máximo de 2,5 (250 %) establecido por UNE-EN 15129 en su apartado 8.2.3.4.1 (expresión (39) de esta guía). Tanto en la dirección principal X como en Y se obtienen deformaciones $\varepsilon_{q,max} < 2,5$. La mayor deformación tangencial se produce en los estribos con las propiedades LBDP con un valor $\varepsilon_{q,max} = 2,428$, que ya es muy próximo al límite de 2,5.

Por otra parte, al ser la relación $d_{bd}/d_G > 3$ (tomando d_G de las tablas 30 y 31), según el criterio heurístico indicado en el apartado 9.1 de esta guía, es de esperar que el dimensionamiento de los aisladores sísmicos vendrá condicionado por el cumplimiento de UNE-EN 15129 y no por los requisitos de UNE-EN 1337-3 frente a las combinaciones no sísmicas. Si d_{bd}/d_G hubiera sido menor que 3, las combinaciones que habrían gobernado el dimensionamiento probablemente habrían sido las no sísmicas, y el dispositivo sería un apoyo elastomérico según UNE-EN 1337-3 que podría dimensionarse según se explica en la *Guía para el cálculo de apoyos elastoméricos* [18] y su guía de ejemplo [19]. A continuación, habría que haber comprobado dicho apoyo frente a la combinación sísmica según UNE-EN 1998-2 y UNE-EN 15129. De hecho, un apoyo elastomérico en el que gobiernan las combinaciones no sísmicas es probable que pueda cumplir simplemente con los requerimientos de los aisladores elastoméricos "sencillos" o con los de los aisladores elastoméricos según UNE-EN 15129 sometidos a "acciones sísmicas pequeñas".

Por lo tanto, *a priori* parece que los aisladores elastoméricos pre-dimensionados en el apartado 9.1 mediante el método del modo fundamental podrían ser aptos para funcionar como aisladores LDRB según UNE-EN 15129. Para confirmar esta asunción se deben cumplir el resto de las comprobaciones resumidas en el apartado 7 de esta guía. Si se cumplieran las condiciones desarrolladas en el apartado 6 para poder utilizar el método del modo fundamental como método de dimensionamiento, las comprobaciones del aislador según UNE-EN 15129 podrían realizarse directamente con los resultados de las tablas 24, 25, 30 y 31, añadiendo también los debidos al análisis del resto de hipótesis de cálculo definidas en los apartados 4.3.2 y 4.3.3 de esta guía. Sin embargo, con fines didácticos, las comprobaciones de los aisladores según UNE-EN 15129 se desarrollan en el apartado 9.4 con los resultados proporcionados por el análisis con el método espectral multimodal.

En los siguientes apartados 9.3.1 y 9.3.2 se va a evaluar si los aisladores elastoméricos pre-dimensionados se pueden considerar como aisladores elastoméricos "sencillos", según UNE-EN 1998-2 y como aisladores elastoméricos según UNE-EN 15129 sometidos a "acciones sísmicas pequeñas".

9.3.1 Viabilidad de los aisladores como LDRB "sencillos" según UNE-EN 1998-2

Se verifica, en primer lugar, si se cumple el requisito de deformaciones tangenciales en los aisladores elastoméricos de estribos, $\varepsilon_{q,d,E}$, y de pilas, $\varepsilon_{q,d,P}$ calculados según el apartado 7.6.2(2) y 7.6.2(6) de UNE-EN 1998-2 empleando las propiedades LBDP del elastómero, que son las que dan lugar a una mayor deformación tangencial, para determinar si son menores de 2 (200 %) y se pueden tratar los apoyos elastoméricos como aisladores sísmicos "sencillos". El desplazamiento de cálculo para los aisladores "sencillos" es la suma vectorial del desplazamiento

máximo en cada dirección principal, d_{max} , que se obtiene según se indica en la expresión (37), que en este caso se aplica con los desplazamientos con propiedades LBDP de las tablas 32 y 33 para los aisladores de estribos y pilas, respectivamente. Las expresiones utilizadas con las siguientes, donde se ha añadido el subíndice E para referirse a los estribos, y la P para referirse a las pilas.

$$v_{xy,d,E} = \sqrt{d_{max,x,E}^2 + d_{max,y,E}^2} = \sqrt{315,6^2 + 280,5^2} = 422,2 \text{ mm}$$

$$\varepsilon_{q,d,E} = \frac{v_{xy,d,E}}{T_{q,E}} = \frac{422,2}{130} = 3,247 > 2$$

$$v_{xy,d,P} = \sqrt{d_{max,x,P}^2 + d_{max,y,P}^2} = \sqrt{258,5^2 + 243,0^2} = 354,8 \text{ mm}$$

$$\varepsilon_{q,d,P} = \frac{v_{xy,d,P}}{T_{q,P}} = \frac{354,8}{220} = 1,613 < 2$$

Los aisladores de los estribos están muy lejos de los límites que permitirían tratarlos con aisladores elastoméricos LDRB "sencillos". En cambio, los aisladores de las pilas sí que podrían tener la consideración de "sencillos" y ser por tanto apoyos elastoméricos según UNE-EN 1337-3 sin obligación de cumplimiento de UNE-EN 15129. De cara a esta guía, estos aisladores se van a dimensionar según UNE-EN 15129, es decir, como "no sencillos".

9.3.2 Viabilidad de los aisladores como LDRB que se consideran sometidos a "acciones sísmicas pequeñas" según UNE-EN 15129 y UNE-EN 1998-2

Se analiza, a continuación, si los aisladores pueden considerarse como LDRB sometidos a "acciones sísmicas pequeñas" según el apartado 8.2.1.1 de UNE-EN 15129 (ver apartado 4.3.4 de esta guía), y por tanto se pueden eximir del cumplimiento de algunos de los requisitos de UNE-EN 15129. En la dirección principal longitudinal, X , y empleando las propiedades nominales (DP) del elastómero se tienen los desplazamientos resumidos en las tablas 24, 25, 30 y 31. Las expresiones utilizadas son las siguientes, donde se ha añadido el subíndice E para referirse a los estribos, y la P para referirse a las pilas.

$$d_{bd,x,E} = 187 \text{ mm} > d_{G,x,E} = 35 \text{ mm}; V_{bd,x,E} = 405 \text{ kN} > V_{G,x,E} = 75,6 \text{ kN}$$

$$d_{bd,x,P} = 151 \text{ mm} > d_{G,x,P} = 14,3 \text{ mm}; V_{bd,x,P} = 492 \text{ kN} > V_{G,x,P} = 50,4 \text{ kN}$$

Se demuestra, por tanto, que los aisladores no pueden considerarse sometidos a "acciones sísmicas pequeñas", ya que no se cumplen las condiciones del apartado 8.2.1.1 de UNE-EN 15129. En la dirección principal transversal, Y , obviamente tampoco se va a cumplir la condición de desplazamientos porque $d_G = 0$. En cualquier caso, es suficiente que no cumpla en una dirección para no poder tratarlos como LDRB sometidos a "acciones sísmicas pequeñas". Esto obliga a que los aisladores de los estribos deban cumplir la totalidad de los requisitos de UNE-EN 15129 para poder considerarlos aisladores sísmicos LDRB. Los aisladores de las pilas tendrán que cumplir plenamente con los requisitos de UNE-EN 15129 en caso de que se opte por no dimensionarlos como aisladores elastoméricos "sencillos".

9.4 Comprobación de los aisladores sísmicos utilizando la respuesta sísmica obtenida con el método espectral multimodal

En este apartado se procede a definir de forma detallada las características de los aisladores sísmicos (número y espesor de cada capa de elastómero, espesor de las placas de zunchado de acero) y a realizar todas las comprobaciones del sistema de aislamiento que exige la norma UNE-EN 1998-2, la cual a su vez remite a comprobaciones de UNE-EN 15129 y de UNE-EN 1337-3.

En esta verificación se usa el método espectral multimodal para obtener los desplazamientos sísmicos, en vez del método del modo fundamental, para lo cual se hace uso del modelo numérico representado en la figura 18. Como el puente es simétrico en planta y en alzado (salvo por una pila que es 30 cm más alta que la otra) y además las pilas son circulares, es de esperar que los resultados varíen muy poco respecto de los mostrados al realizar el pre-dimensionamiento según el método del modo fundamental (apartado 9.1 de esta guía).

Para poder utilizar el método espectral multimodal se debe garantizar que se alcance más del 90 % de masa movilizada en cada dirección (apartado 4.3.3.2.1(3) de UNE-EN 1998-1). Los dos primeros modos corresponden a movimientos horizontales en Y (transversal) y en X (longitudinal), respectivamente, para los cuales se logra movilizar un 98 % de la masa en dichas direcciones, lo cual nos indica que el análisis con el método del modo fundamental utilizado en el pre-dimensionamiento va a proporcionar resultados muy precisos. Sin embargo, para lograr movilizar el 90 % de la masa en la dirección Z (vertical), es necesario combinar 16 modos de vibración (14 modos adicionales a los dos horizontales fundamentales).

9.4.1 Definición de los aisladores sísmicos

Se define a continuación la geometría completa de los aisladores sísmicos, lo que incluye el número y espesor de cada capa de elastómero que proporciona un valor de T_q próximo al obtenido en el pre-dimensionamiento del apartado 9.1 de esta guía, así como el espesor de las placas de zunchado de acero.

- Aisladores de estribos: dispositivos de apoyo y aislamiento rectangulares de 500 x 500 mm anclados en las dos caras (anclados al estribo y al tablero) con características geométricas correspondientes a un apoyo tipo C, según la tabla 3 de UNE-EN 1337-3. Se trata, por tanto, de un aislador elastomérico con fijación normalizada según el apartado 8.2.3.2 de UNE-EN 15129. El aislador sísmico resultante se muestra en la figura 26 y tiene las siguientes características:

- Módulo de elasticidad transversal nominal: $G_g = 0,9 \text{ MPa}$ ($G = 1,0-1,26 \text{ MPa}$)
- Número y espesor de las capas de elastómero: Once capas de 12 mm ($t_r = t_i = 12 \text{ mm}$; $T_q = 132 \text{ mm}$, que difiere en menos de un 2 % del valor pre-dimensionado)
- Número y espesor de las placas de zunchados: Diez placas de 4 mm ($t_s = 4 \text{ mm}$), en acero S-235, con 5 mm de recubrimiento lateral
- Número y espesor de las placas de extremo: Dos placas (una placa superior y otra inferior) de $t_{se} = 18 \text{ mm}$ cada una, en acero S-235
- Altura total del apoyo: $T_b = 208 \text{ mm}$ (incluidas las placas de extremo)
- Área total en planta: $a \times b = 500 \times 500 = 250.000 \text{ mm}^2$
- Área efectiva: $A' = a' \times b' = 490 \times 490 = 240.100 \text{ mm}^2$
- Área en planta confinada: $A_I = 240.100 \text{ mm}^2$ ($A_I = A'$ porque no hay agujeros)

- Factor de forma de una capa de elastómero: $S = \frac{A_I}{l_p \cdot t_r} = \frac{240.100}{1.960 \cdot 12} = 10,2$

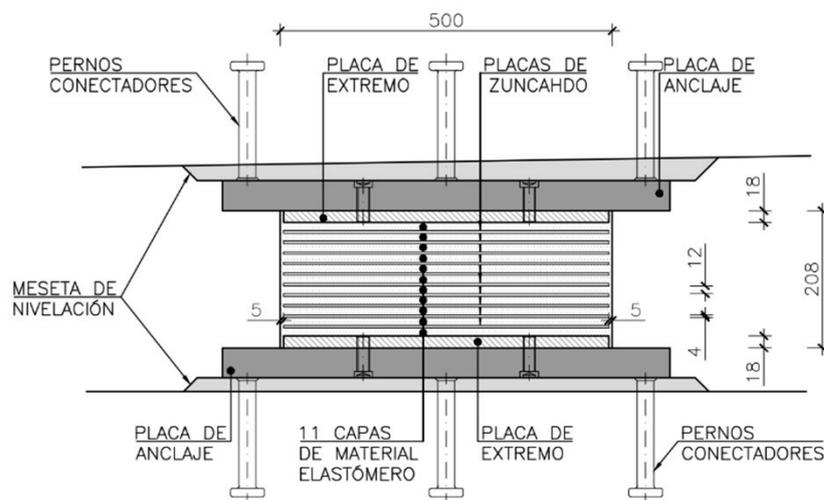


Figura 26 Aislador elastomérico en estribos según UNE-EN 15129

- Aisladores de pilas: dispositivo de apoyo y aislamiento de sección circular de 900 mm de diámetro empotrado en hueco mecanizado en las placas de anclaje, según el apartado 8.2.3.2 de UNE-EN 15129. El aislador sísmico resultante se muestra en la figura 27 y tiene las siguientes características:

- Módulo de elasticidad transversal nominal: $G_g = 0,9 \text{ MPa}$ ($G = 1,0-1,26 \text{ MPa}$)

- Número y espesor de las capas de elastómero: 12 capas de 20 mm ($t_r = t_i = 20$ mm; $T_q = 240$ mm, que difiere en menos de un 10 % del valor predimensionado)
- Número y espesor de las placas de zunchado: 11 placas de 5 mm ($t_s = 5$ mm), en acero S-235, con 5 mm de recubrimiento lateral
- Número y espesor de las placas de extremo: Dos placas (una placa superior y otra inferior) de $t_{se} = 18$ mm cada una, empotradas 15 mm en las placas de anclaje, en acero S-235
- Altura total del apoyo: $T_b = 320$ mm
- Área total en planta: $\pi D^2/4 = \pi \cdot 900^2/4 = 200.000$ mm²
- Área efectiva: $A' = \pi D'^2/4 = \pi \cdot 890^2/4 = 622.114$ mm²
- Área en planta confinada: $A_I = 622.114$ mm² ($A_I = A'$ porque no hay agujeros)
- Factor de forma de una capa de elastómero: $S = \frac{A_I}{l_p \cdot t_r} = \frac{622.114}{2.796 \cdot 20} = 11,13$

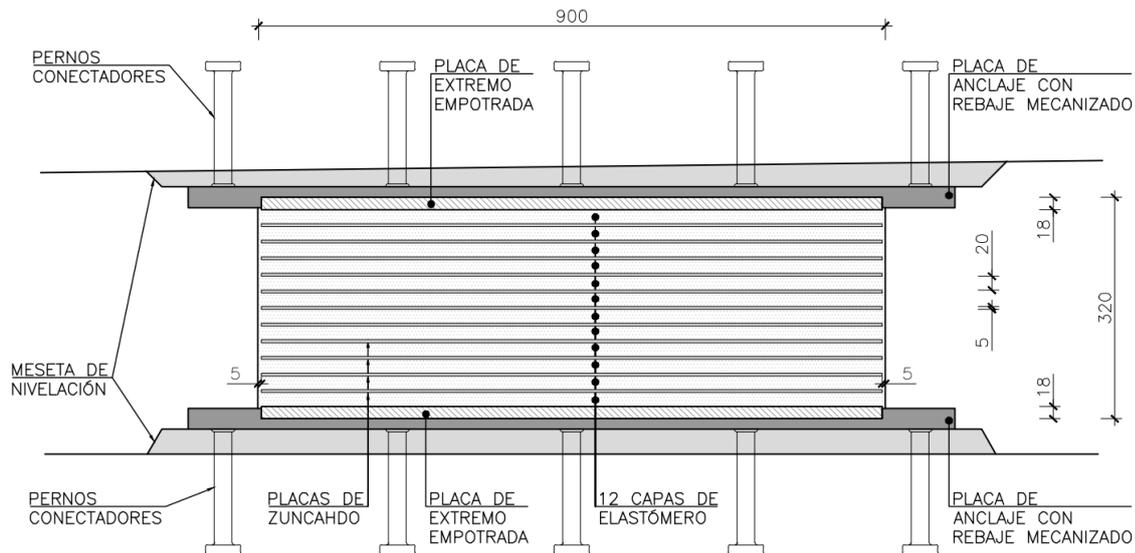


Figura 27 Aislador elastomérico en pilas según UNE-EN 15129

Los valores del módulo de elasticidad transversal, G , que se adoptan para las propiedades DP, UBDP y LBDP son los justificados en el apartado 5.2 de esta guía, y que se resumen a continuación. Se ha añadido al nombre de las variables los subíndices DP, UB o LB para indicar que están calculadas con propiedades DP, UB o LB

$$DP : G = \alpha G_g = 1,25 \cdot 0,9 = 1,125 \text{ MPa}$$

$$UBDP : G_{UB} = 2,00 \text{ MPa}$$

$$LBDP : G_{LB} = 0,77 \text{ MPa}$$

Las pequeñas variaciones en el espesor total de material elastómero, T_q , por ajuste del mismo por el espesor y número de capas considerados en los aisladores, van a modificar sutilmente las rigideces efectivas de los mismos, que requieren ser recalculadas para su uso en el análisis espectral multimodal. Los valores definitivos de T_q y K_b ($K_{eff,b}$) se muestran a continuación en la tabla 34.

Tabla 34 Características y propiedades en combinación sísmica de los aisladores sísmicos dimensionados según UNE-EN 15129

Aisladores sísmicos		Dimensiones en planta (efectivas) [mm x mm]	Altura total de elastómero, T_q [mm]	K_b^a [kN/m]	$K_{b,UB}^a$ [kN/m]	$K_{b,LB}^a$ [kN/m]
Estribos	Dos aisladores rectangulares	500 x 500 (490 x 490)	11 x 12 = 132	2.131	3.784	1.466
Pilas	Un aislador circular	900 (890)	12 x 20 = 240	2.982	5.296	2.052

^a Rigidez lateral de cada apoyo elastomérico (no de cada eje de apoyo).

9.4.2 Consideración de la variabilidad de las propiedades del elastómero en el método espectral multimodal

Según el apartado 7.5.2.4 de UNE-EN 1998-2, el análisis multimodal o el análisis en el dominio del tiempo pueden llevarse a cabo basándose únicamente en las propiedades nominales (DP) si se demuestra mediante el método espectral basado en el modo fundamental que los desplazamientos sísmicos de cálculo respecto del suelo en el centro de rigidez del tablero, d_{cd} , utilizando las propiedades UBDP y LBDP no difieren en $\pm 15\%$ respecto del obtenido con las propiedades nominales (ver apartado 6.2 de esta guía). Para el puente ejemplo de esta guía, es necesario considerar la variación de propiedades ya que, para UBDP, la variación $\Delta d_{cd}/d_{c,DP}$ es del 18,8% ($> 15\%$), tal y como muestra la tabla 35 (obtenida a partir de los resultados mostrados en la tabla 26). La variación de desplazamientos es menor, no obstante, que con los apoyos elastoméricos dimensionados según UNE-EN 1337-3 tratados en el apartado 8 de esta guía ya que, al aumentar el periodo de vibración de la estructura debido al uso de aisladores de menor rigidez efectiva, la respuesta del modo fundamental se produce próxima a la zona de desplazamientos constantes del espectro de respuesta.

Tabla 35 Variación $\Delta d_{cd}/d_{c,DP}$ del desplazamiento del centro de rigidez, d_{cd} , con propiedades DP, UBD y LBDP

Propiedades	T_{eff} [s]	V_{cd} [kN]	d_{cd} [mm]	$\Delta d_{cd}/d_{c,DP}$
DP	1,78	2.593	187	—
UBDP	1,64	3.587	153	-18,18 %
LBDP	2,54	1.838	187	0,00 %

9.4.3 Fuerzas y desplazamientos de cálculo

Las tablas 36 y 37 muestran las fuerzas y desplazamientos en los aisladores correspondientes a las hipótesis de situación sísmica del apartado 4.3 de esta guía para los valores nominal, límite superior y límite inferior de las propiedades del elastómero. La nomenclatura empleada utiliza la letra v para designar los desplazamientos provocados por las acciones de la expresión (1), y la letra d para referirse a los desplazamientos calculados con la expresión (2). Nótese que, en el caso general de un puente, las acciones empleadas para obtener los d no son todas las de la expresión (1); concretamente, en la expresión (1) interviene una parte de la sobrecarga ($\psi_{2,i}Q_i$) que se emplea para calcular los v pero no se aplica para calcular los d , tal y como establece UNE-EN 1998. Nótese también que tanto para la obtención del v al que se refiere UNE-EN 1998-2 en el apartado 7.6.2(6) como de d , el desplazamiento del aislador debido únicamente a las acciones sísmicas en combinación sísmica está mayorado por el coeficiente de amplificación por fiabilidad γ_x . La definición de algunas de las variables de respuesta que se utilizan a continuación ya se ha realizado en el apartado 2 y se repite aquí por conveniencia:

- $v_{G,x}$ $v_{G,y}$ desplazamientos máximos relativos entre las placas de extremo del aislador en las direcciones principales horizontales, X e Y , debidos únicamente a las acciones no sísmicas en situación sísmica de la expresión (1). En el ejemplo estudiado, el término $\psi_{2,i}Q_i$ de la expresión (1) proporciona desplazamientos horizontales despreciables en el modelo global (del orden de 0,5 a 1 mm en X), y se pueden despreciar, es decir que $\psi_{2,i}Q_i \approx 0$. Por tanto, en el ejemplo de esta guía, $v_{G,x}$ y $v_{G,y}$ se pueden considerar coincidentes con los desplazamientos debidos a las acciones no sísmicas en situación sísmica de la expresión (2), d_G , que denominamos $d_{G,x}$ y $d_{G,y}$ en las direcciones principales horizontales X e Y , respectivamente. Es decir, $v_{G,x} \approx d_{G,x}$ y $v_{G,y} \approx d_{G,y}$
- $v_{z,d}$ desplazamiento máximo relativo entre las placas de extremo del aislador en la dirección principal vertical, Z , debido a las acciones sísmicas y no sísmicas en situación sísmica de la expresión (1). Se toman como positivos los desplazamientos en sentido de la aceleración de la gravedad
- $v_{x,d}$ desplazamiento máximo relativo entre las placas de extremo del aislador en la dirección principal horizontal X considerando las acciones sísmicas y no sísmicas en situación sísmica de la expresión (1). Cuando la dirección X es la principal y dominante, en las tablas 36 y 37 se muestra como $v_{x,d} = \gamma_x d_{bd,x} + d_{G,x} = d_{max,x} = d_{max}$. Cuando la dirección X no es la principal, en las tablas 36 y 37 se muestra como $v_{x,d} = 0,3(\gamma_x d_{bd,x} + d_{G,x}) = 0,3 d_{max,x} = 0,3 d_{max}$
- $v_{y,d}$ desplazamiento máximo relativo entre las placas de extremo del aislador en la dirección principal horizontal Y considerando las acciones sísmicas y no sísmicas en situación sísmica de la expresión (1). Cuando la dirección Y es la principal y dominante, en las tablas 36 y 37 se muestra como $v_{y,d} = \gamma_x d_{bd,y} + d_{G,y} = d_{max,y} = d_{max}$. Cuando la dirección X no es la principal, en las tablas 36 y 37 se muestra como $v_{y,d} = 0,3(\gamma_x d_{bd,y} + d_{G,y}) = 0,3 d_{max,y} = 0,3 d_{max}$

- d_{max} desplazamiento máximo de cálculo en una dirección principal horizontal calculado con la expresión (2). En la dirección principal horizontal X se le denomina $d_{max,x}$, y en la dirección Y , $d_{max,y}$
- α_{long} giro del aislador según un eje paralelo a la dirección principal horizontal, X , calculado con las acciones de la expresión (1); a efectos de comprobar la deformación tangencial total de cálculo según el apartado 8.2.3.4.2 de UNE-EN 15129 y la definición de $\epsilon_{a,d}$ de UNE-EN 1337-3 se emplea el ángulo $\alpha_{b,d}$ que vale $\alpha_{b,d} = \min\{\alpha_{long}; 0,003\}$
- α_{trans} giro del aislador según un eje paralelo a la dirección principal horizontal, Y , calculado con las acciones de la expresión (1); a efectos de comprobar la deformación tangencial total de cálculo según el apartado 8.2.3.4.2 de UNE-EN 15129 y la definición de $\epsilon_{a,d}$ de UNE-EN 1337-3 se emplea el ángulo $\alpha_{a,d}$ que vale $\alpha_{a,d} = \min\{\alpha_{trans}; 0,003\}$
- $F_{z,d}$ fuerza según la dirección principal vertical, Z , asociada al desplazamiento $v_{z,d}$. Se toma como positiva en la dirección de la aceleración de la gravedad
- $F_{x,d}$ fuerza según la dirección principal horizontal, X , asociada al desplazamiento $v_{x,d}$
- $F_{y,d}$ fuerza según la dirección principal horizontal, Y , asociada al desplazamiento $v_{x,d}$

Tabla 36 Estribos. Fuerzas y desplazamiento en situación sísmica

Prop.	Hip.	Desplazamientos y giros								Fuerzas		
		$v_{G,x} \approx d_{G,x}$ [mm]	$v_{G,y} \approx d_{G,y}$ [mm]	$v_{z,d}$ [mm]	$v_{x,d}$ [mm]	$v_{y,d}$ [mm]	d_{max} [mm]	α_{long} [mrad]	α_{trans} [mrad]	$F_{z,d}$ [kN]	$F_{x,d}$ [kN]	$F_{y,d}$ [kN]
DP	I	8,5	0,0	1,03	92	271	271	0,00	0,21	969	198	577
	II	29,9	0,0	-0,03	114	271	271	0,00	1,97	-25	244	577
	III	34,1	0,0	0,81	316	81	316	0,00	1,28	771	673	173
	IV	34,1	0,0	0,38	316	81	316	0,00	1,99	365	673	173
UBDP	I	8,5	0,0	0,75	78	222	222	0,00	0,23	1.058	295	839
	II	29,9	0,0	-0,22	99	222	222	0,00	1,99	-114	376	839
	III	34,1	0,0	0,57	266	67	266	0,00	1,34	798	1.006	252
	IV	34,1	0,0	0,24	266	67	266	0,00	2,05	339	1.006	252
LBDP	I	8,5	0,0	1,27	92	273	273	0,00	0,21	900	135	400
	II	29,9	0,0	0,06	114	273	273	0,00	1,97	44	167	400
	III	34,3	0,0	1,05	314	82	314	0,00	1,28	750	460	120
	IV	34,3	0,0	0,54	314	82	314	0,00	1,99	386	460	120

$v_{z,d}$ $F_{z,d}$: se toman como positivos cuando van en el sentido de la aceleración de la gravedad.

Las casillas sombreadas en gris indican los valores que se utilizan en la comprobación desarrollada paso a paso del apartado 9.4.5.1 de esta guía.

Tabla 37 Pilas. Fuerzas y desplazamiento en situación sísmica

Prop.	Hip.	Desplazamientos								Fuerzas		
		$v_{G,x} \approx d_{G,x}$ [mm]	$v_{G,y} \approx d_{G,y}$ [mm]	$v_{z,d}$ [mm]	$v_{x,d}$ [mm]	$v_{y,d}$ [mm]	d_{max} [mm]	α_x [mrad]	α_y [mrad]	$F_{z,d}$ [kN]	$F_{x,d}$ [kN]	$F_{y,d}$ [kN]
DP	I	10,1	0,0	5,40	79	68	79	1,19	2,80	8,267	235	202
	II	1,1	0,0	2,75	70	68	70	1,19	2,42	4,215	215	202
	III	11,8	0,0	4,69	241	68	241	1,19	6,71	7,187	718	202
	IV	11,8	0,0	3,69	241	68	241	1,19	7,01	5,655	718	202
UBDP	I	8,2	0,0	3,04	58	49	58	1,50	3,27	8,267	305	261
	II	0,9	0,0	1,90	50	49	50	1,50	2,92	4,215	277	261
	III	9,7	0,0	3,25	174	49	174	1,50	8,29	7,187	922	261
	IV	9,7	0,0	2,56	174	49	174	1,50	8,58	5,655	922	261
LBDP	I	11,0	0,0	7,12	84	72	84	0,87	2,36	8,267	172	148
	II	3,6	0,0	3,63	74	72	74	0,87	1,98	4,215	156	148
	III	12,9	0,0	6,19	255	72	255	0,87	5,23	7,187	522	148
	IV	12,9	0,0	4,87	255	72	255	0,87	5,53	5,655	522	148

$v_{z,d}$ $F_{z,d}$ se toman como positivos cuando van en el sentido de la aceleración de la gravedad.

Las casillas sombreadas en gris indican los valores que se utilizan en la comprobación desarrollada paso a paso del apartado 9.4.5.1 de esta guía.

9.4.3.1 Fuerzas de dimensionamiento de la subestructura

Cada elemento de la subestructura debe ser capaz de resistir los efectos de las fuerzas horizontales que transmiten los aisladores apoyados en el mismo cuando estos alcanzan el desplazamiento horizontal máximo, d_{max} , (mayorado por el coeficiente de fiabilidad γ_f) en una determinada dirección principal, según se indica en el apartado 7.6.2(4)P de UNE-EN 1998-2. Finalmente, los efectos combinados de las acciones sísmicas actuando en cada dirección del terremoto, se combinan con los efectos de las acciones no sísmicas en situación sísmica según la expresión (1), y con ello se obtienen los valores de proyecto de los efectos de las acciones que actúan en la situación sísmica.

Las fuerzas de cálculo en cabeza de la subestructura (base de los aisladores) son las indicadas en las columnas de fuerzas de las tablas 36 y 37 para cada una de las hipótesis consideradas (I, II, III y IV) y para cada uno de los límites de propiedades (DP, UBDP, LBDP).

Para calcular los esfuerzos en las pilas, estas fuerzas podrán reducirse dividiendo hasta por $q = 1,5$ (valor asociado a la sobrerresistencia) en caso de que se haya considerado ductilidad limitada, según se explica en el apartado 5.5 de esta guía. No será así en las cimentaciones,

en donde UNE-EN 1998-2 exige que el comportamiento sea esencialmente elástico y hay que adoptar $q = 1$.

9.4.3.2 Fuerzas de dimensionamiento de los anclajes de los aisladores

Según se indica en el apartado 4.4.2 y en el anexo H de UNE-EN 15129, las uniones o anclajes a la estructura deben dimensionarse con un coeficiente de sobrerresistencia $\gamma_{Rd} = 1,1$ aplicable sobre la fuerza de cálculo, F_{UB} . Esta fuerza es la correspondiente al desplazamiento máximo incrementado por el factor de seguridad en aisladores, $\gamma_b d_{max}$ (o $\gamma_b d_{Ed}$), empleando el límite superior de las propiedades del aislador (UBDP). El factor de seguridad en aisladores debe tomarse como $\gamma_b = 1,15$, según el apartado 8.2.1.2.7 de UNE-EN 15129. En las tablas 38 y 39 se muestran los valores de cálculo para el dimensionamiento de los anclajes, $\gamma_{Rd} F_{UB}$, de los aisladores de estribos y pilas.

Tabla 38 Estribos. Fuerzas de dimensionamiento de anclajes, $\gamma_{Rd} F_{UB}$

Hipótesis	F_d [kN]		F_{UB} [kN]		$\gamma_{Rd} F_{UB}$ [kN]	
	$F_{x,d}$	$F_{y,d}$	$F_{UB,x}$	$F_{UB,y}$	$\gamma_{Rd} F_{UB,x}$	$\gamma_{Rd} F_{UB,y}$
I	295	839	339	965	373	1.062
II	376	839	432	965	414	1.062
III	1.006	252	1.157	290	1.273	319
IV	1.006	252	1.157	290	1.273	319

Adicionalmente, los anclajes de los aisladores de los estribos tendrán que resistir una fuerza vertical de tracción, correspondiente a la hipótesis de II de $\gamma_{Rd} F_{UB,z} = -1,1 \cdot 1,15 \cdot 114 = 144,2$ kN (a no ser que se demuestre que la tracción no se produce gracias a la contribución del tope anti-levantamiento).

Tabla 39 Pilas. Fuerzas de dimensionamiento de anclajes, $\gamma_{Rd} F_{UB}$

Hipótesis	F_d [kN]		F_{UB} [kN]		$\gamma_{Rd} F_{UB}$ [kN]	
	$F_{x,d}$	$F_{y,d}$	$F_{UB,x}$	$F_{UB,y}$	$\gamma_{Rd} F_{UB,x}$	$\gamma_{Rd} F_{UB,y}$
I	305	261	351	300	386	330
II	277	261	319	300	386	330
III	922	261	1.060	300	386	330
IV	922	261	1.060	300	386	330

9.4.4 Límites inferiores de d_{cd} y V_{cd} para el método espectral multimodal

El apartado 7.5.5(6) de UNE-EN 1998-2 establece unos límites inferiores para el desplazamiento sísmico del centro de rigidez del tablero respecto del suelo, d_{cd} , y para el cortante basal sísmico del puente, V_{cd} , mediante el cumplimiento de las expresiones (45) y (46), respectivamente.

$$\rho_d = \frac{d_{cd}}{d_{cf}} \geq 0,8 \quad (45)$$

$$\rho_V = \frac{V_d}{V_f} \geq 0,8 \quad (46)$$

donde:

d_{cd} d_{cf} desplazamientos del centro de rigidez del tablero respecto del suelo, d_{cd} , calculados mediante el método espectral multimodal y el método espectral basado en el modo fundamental, respectivamente

V_d V_f cortantes basales sísmicos del puente, V_{cd} , calculados mediante el método espectral multimodal y el método espectral basado en el modo fundamental, respectivamente

ρ_d ρ_V coeficientes de límite inferior para desplazamientos y fuerzas sísmicas

En la tabla 35 se muestran los valores de d_{cd} y V_{cd} obtenidos mediante el método del modo fundamental, y que se nombran como d_{cf} y V_f para aplicar las expresiones (45) y (46), y que también se incluyen en la tabla 40.

Tabla 40 Límites inferiores de d_{cd} y V_{cd} para la aplicación del método multimodal con propiedades DP, UBDP y LBDP

Propiedades	Multimodal		Modo fundamental		Límite inferior	
	d_{cd} [mm]	V_d [kN]	d_{cd} [mm]	V_{cd} [kN]	ρ_d	ρ_V
DP	188	2.512	187	2.593	1,00 > 0,8	0,97 > 0,8
UBDP	155	3.500	153	3.587	1,01 > 0,8	0,98 > 0,8
LBDP	187	1.760	187	1.838	1,838 > 0,8	0,96 > 0,8

Se demuestra que, tal y como era de prever dadas las condiciones de simetría del puente de ejemplo, el método basado en el modo fundamental consigue replicar de forma casi exacta la respuesta que se obtiene mediante el método multimodal. Si no se hubiera cumplido la limitación de las expresiones (45) y (46), habría que haber amplificado los efectos de las acciones sísmicas

obtenidos mediante el método espectral multimodal por $0,8/\rho_d$ para los desplazamientos y $0,8/\rho_f$ para las fuerzas, según se indica en el apartado 7.5.5(7) de UNE-EN 1998-2. Si no se cumplen las limitaciones de las expresiones (45) y (46) porque el puente es muy singular (pilas elevadas o puentes con grandes excentricidades de torsión), el apartado 7.5.5(8) recomienda aplicar las limitaciones y ampliaciones sólo al primer modo del puente en cada dirección.

9.4.5 Comprobaciones de dimensionamiento

En este apartado se van a realizar las comprobaciones completas de los aisladores de estribos y pilas frente a las cuatro hipótesis planteadas en el apartado 4.3 de esta guía, utilizando las propiedades DP, UBDP y LDBP.

En el apartado 9.4.5.1 se desarrollan, con fines didácticos, las comprobaciones de UNE-EN 15129 usando las expresiones resumidas en el apartado 7 de esta guía, aplicadas a los casos de propiedades DP de aisladores de estribos y pilas frente a la hipótesis III, que es la más desfavorable para los aisladores ya que es la que produce la máxima deformación tangencial frente a los desplazamientos horizontales.

En el apartado 9.4.5.2 se resumen los resultados de las comprobaciones de UNE-EN 15129 con propiedades DP, UBDP y LDBP frente a las hipótesis I, II, III y IV, es decir, todos los casos. Los resultados se muestran en las tablas 36 y 37.

9.4.5.1 Comprobación paso a paso de los aisladores con propiedades nominales frente a la hipótesis de cálculo III

Se muestra a continuación la comprobación completa de los aisladores de los estribos y las pilas, con las propiedades nominales, para la hipótesis de cálculo III (máximo desplazamiento horizontal con máxima compresión concomitante), cuyos valores de respuesta en desplazamientos y fuerzas se muestran en las tablas 36 y 37 sombreados en **gris**. En esta hipótesis III, la componente de la acción sísmica que se toma como dominante es el sismo en dirección principal X y las comprobaciones de desplazamientos se hacen también en la dirección principal X .

9.4.5.1.1 Aisladores de estribos

- **Área reducida, A_r (8.2.3.1 y 8.2.3.2 de UNE-EN 15129; apartado 5.1.2 de esta guía):**

En primer lugar, se obtiene el área reducida, A_r , una vez deformado el aislador frente a las acciones horizontales no sísmicas de la combinación sísmica, $v_{G,x}$ y $v_{G,y}$, que en general cumplen que $v_{G,x} \approx d_{G,x}$ y $v_{G,y} \approx d_G$.

$$A_r = A' \cdot \left(1 - \frac{v_{G,x}}{a'} - \frac{v_{G,y}}{b'} \right) = 240.100 \cdot \left(1 - \frac{34,1}{490} - \frac{0}{490} \right) = 223.391 \text{ mm}^2$$

- **Deformación tangencial de cálculo debido a la carga de compresión en combinación sísmica, $\varepsilon_{c,EI}$ (apartado 8.2.3.3.2 de UNE-EN 15129; apartado 7.2 de esta guía):**

$$\varepsilon_{c,EI} = \frac{6 \cdot S \cdot N_{Ed,max}}{A_r \cdot E_{I,c}} = \frac{6 \cdot 10,2 \cdot 771}{223.391 \cdot 705,65} \cdot 10^3 = 0,30$$

En donde $N_{Ed,max}$ es el valor de F_z de la hipótesis III en DP de la tabla 36; y el módulo de compresión suponiendo que el material es incompresible, $E_{I,c}$, se obtiene de la siguiente forma:

$$E_{I,c} = 3G(1 + 2S^2) = 3 \cdot 1,125 \cdot (1 + 2 \cdot 10,2^2) = 705,65 \text{ MPa}$$

- **Deformación tangencial debida al desplazamiento horizontal, $\varepsilon_{q,max}$ (apartado 8.2.3.3.3 de UNE-EN 15129; apartado 7.2 de esta guía):**

$$\varepsilon_{q,max} = \frac{d_{max}}{T_q} = \frac{d_{max,x}}{T_q} = \frac{316}{132} = 2,39 < 2,5$$

Se demuestra que cumple la limitación de $\varepsilon_{q,max} \leq 2,5$ del apartado 8.2.3.3.3 de UNE-EN 15129, con un factor de seguridad adicional de $2,5/2,39 = 1,04$.

- **Deformación tangencial debida a la rotación angular, $\varepsilon_{\alpha,d}$ (apartado 8.2.3.3.4 de UNE-EN 15129 y 5.3.3.4 de UNE-EN 1337-3; apartado 7.2 de esta guía):**

$$\varepsilon_{\alpha,d} = \frac{(a'^2 \cdot \alpha_{a,d} + b'^2 \cdot \alpha_{b,d}) t_i}{2 \sum t_i^3} = \frac{(490^2 \cdot 0,003 + 490^2 \cdot 0,003) \cdot 12}{2 \cdot 11 \cdot 12^3} = 0,45$$

Con $a' = b' = D'$. Se han empleado en ambas direcciones los límites inferiores de las rotación angulares $\alpha_{a,d}$ y $\alpha_{b,d}$ (0.003 radianes = 3 mrad) que establece el apartado 8.2.3.4.2 de UNE-EN 15129 ya que $\alpha_x = 0,00$ mrad, y $\alpha_y = 1,28$ mrad.

- **Deformación tangencial máxima de cálculo, $\varepsilon_{t,d}$ (apartado 8.2.3.4.2 de UNE-EN 15129; apartado 7.2 de esta guía):**

$$\varepsilon_{t,d} = K_L(\varepsilon_{c,EI} + \varepsilon_{q,max} + \varepsilon_{\alpha,d}) = 1 \cdot (0,30 + 2,39 + 0,46) = 3,15 \leq \frac{7,0}{\gamma_m} = 7,0$$

Se demuestra que cumple la limitación de $\varepsilon_{t,d} \leq 7,0/\gamma_m$ del apartado 8.2.3.4.2 de UNE-EN 15129, con un factor de seguridad adicional de $7/3,15 = 2,22$.

- **Deformación de tracción máxima (apartado 8.2.1.2.7 de UNE-EN 15129; apartado 7.3 de esta guía):**

No es de aplicación ya que, en los estribos, para la hipótesis de cálculo III en concreto, no se llegan a producir tracciones.

- **Espesor mínimo de las placas de zunchado de acero (apartado 5.3.3.5 de UNE-EN 1337-3; apartado 7.6 de esta guía):**

La verificación de este requisito es automática puesto que ya se ha demostrado en la *Guía para el cálculo de apoyos elastoméricos. Ejemplo de aplicación* [19] que las placas de 4 mm cumplen para la mayor carga vertical, que tiene en cuenta toda la sobrecarga de uso. Con fines didácticos, se muestra la comprobación para la hipótesis III, que incluye un 30 % de la componente vertical de la acción sísmica actuando como compresión sobre el aislador. El espesor mínimo necesario debido a esta combinación sísmica es:

$$t_s = \frac{K_p \cdot N_{Ed,max} \cdot (t_1 + t_2) \cdot K_h \cdot Y_m}{A_r \cdot f_y} = \frac{1,3 \cdot 771 \cdot (12 + 12) \cdot 1 \cdot 1}{223.391 \cdot 235} 10^3 = 0,46 \text{ mm}$$

Se demuestra que cumple la limitación del apartado 5.3.3.5 de UNE-EN 1337-3 en situación sísmica, ya que se han dispuesto placas de 4 mm, resultando en un factor de seguridad adicional de $4/0,46 = 8,70$.

- **Estabilidad al pandeo bajo acciones sísmicas (apartados 8.2.3.3.4 y 8.2.3.4.4 de UNE-EN 15129; apartado 7.4 de esta guía):**

Se obtiene la carga crítica para desplazamiento lateral nulo:

$$P_{cr} = \frac{\lambda \cdot G \cdot A_r \cdot a' \cdot S}{T_q} = \frac{1,3 \cdot 1,125 \cdot 223.391 \cdot 490 \cdot 10,2}{132} 10^{-3} = 12.370 \text{ kN}$$

El aislador es estable cuando se cumple que:

$$N_{Ed,max} < \frac{P_{cr}}{2} \rightarrow 771 < \frac{12.370}{2} = 6.185 \text{ kN}$$

como $N_{Ed,max} < P_{cr}/4 = 3093 \text{ kN}$, se debe verificar:

$$\delta \leq 0,7 \rightarrow 0,65 \leq 0,7$$

donde δ depende de d_{max} :

$$\delta = \frac{d_{Ed}}{a'} = \frac{d_{max}}{D'} = \frac{316}{490} = 0,65$$

Se demuestra que cumple la limitación del apartado 8.2.3.4.4 con un factor de seguridad adicional de $0,7/0,65 = 1,07$.

- **Estabilidad de rodamiento bajo acciones sísmicas (apartados 8.2.3.4.5 de UNE-EN 15129; apartado 7.5 de esta guía):**

Esta comprobación no es de aplicación en los aisladores de estribos, ya que estos disponen de una fijación normalizada, que ancla la placa de extremo con la placa de anclaje frente a tensiones de tracción, por lo que no se puede dar la condición de rodamiento.

9.4.5.1.2 Aisladores de pilas

- **Área reducida, A_r (8.2.3.1 y 8.2.3.3.2 de UNE-EN 15129; apartado 5.1.2 de esta guía):**

En primer lugar, se obtiene el área reducida, A_r , una vez deformado el aislador frente a las acciones horizontales no sísmicas de la combinación sísmica, $v_{G,x}$ y $v_{G,y}$, que en general cumplen que $v_{G,x} \approx d_{G,x}$ y $v_{G,y} \approx d_{G,x}$.

$$A_r = A' \cdot \left(1 - \frac{v_{G,x}}{a'} - \frac{v_{G,y}}{b'} \right) = 622.114 \cdot \left(1 - \frac{11,8}{890} - \frac{0}{890} \right) = 613.866 \text{ mm}^2$$

- **Comentario:** la 2.^a generación de la norma EN-1337-3, la prEN 1337-3 (2018), incluye una formulación particular para un cálculo más preciso de A_r en apoyos circulares: Se comprueba que la diferencia entre la aplicación de la expresión vigente y la de la pre-norma es reducida (0,35 % de diferencia). En adelante, en esta guía, se aplicará la expresión de prEN 1337-3, ya que proporciona un A_r levemente inferior, lo cual será conservador.

$$\begin{aligned} A_r &= \frac{1}{2} \left[\frac{4 \cdot A'}{\pi} \cdot \arcsen \left(\frac{\sqrt{D'^2 - v_{G,xy}^2}}{D'} \right) - \left(v_{G,xy} \sqrt{D'^2 - v_{G,xy}^2} \right) \right] = \\ &= \frac{1}{2} \left[\frac{4 \cdot 622.114}{\pi} \cdot \arcsen \left(\frac{\sqrt{890^2 - 11,8^2}}{890} \right) - \left(11,8 \cdot \sqrt{890^2 - 11,8^2} \right) \right] = \\ &= 611.612 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

- **Deformación tangencial de cálculo debido a la carga de compresión en combinación sísmica, $\varepsilon_{c,El}$ (apartado 8.2.3.3.2 de UNE-EN 15129; apartado 7.2 de esta guía):**

$$\varepsilon_{c,El} = \frac{6 \cdot S \cdot N_{Ed,max}}{A_r \cdot E_{I,c}} = \frac{6 \cdot 11,13 \cdot 7.187}{611.612 \cdot 839} \cdot 10^3 = 0,94$$

En donde $N_{Ed,max}$ es el valor de $F_{z,d}$ de la hipótesis III en DP de la Tabla 37; y el módulo de compresión suponiendo que el material es incompresible, $E_{I,c}$, se obtiene de la siguiente forma:

$$E_{I,c} = 3G(1 + 2S^2) = 3 \cdot 1,125 \cdot (1 + 2 \cdot 11,13^2) = 839 \text{ MPa}$$

- **Deformación tangencial debida al desplazamiento horizontal, $\varepsilon_{q,max}$ (apartado 8.2.3.3.3 de UNE-EN 15129; apartado 7.2 de esta guía):**

$$\varepsilon_{q,max} = \frac{d_{max}}{T_q} = \frac{d_{max,x}}{T_q} = \frac{241}{240} = 1,00 < 2,5$$

Se demuestra que cumple la limitación de $\varepsilon_{q,max} \leq 2,5$ del apartado 8.2.3.3.3 de UNE-EN 15129, con un factor de seguridad adicional de $2,5/1,00 = 2,50$.

- **Deformación tangencial debida a la rotación angular, $\varepsilon_{\alpha,d}$ (apartado 8.2.3.3.4 de UNE-EN 15129; apartado 7.2 de esta guía):**

$$\varepsilon_{\alpha,d} = \frac{(a'^2 \cdot \alpha_{a,d} + b'^2 \cdot \alpha_{b,d}) t_i}{2 \sum t_i^3} = \frac{(890^2 \cdot 0,003 + 890^2 \cdot 0,00671) \cdot 20}{2 \cdot 12 \cdot 20^3} = 0,80$$

Con $a' = b' = D'$. En la dirección X se ha empleado el límite inferior de la rotación angular $\alpha_{a,d}$ (0.003 radianes = 3 mrad) que establece el apartado 8.2.3.4.2 de UNE-EN 15129 ya que $\alpha_x = 1,19$ mrad, y en la dirección Y $\alpha_{b,d} = \alpha_y = 6,71$ mrad.

- **Comentario:** la 2.ª generación de la norma EN-1337-3, la prEN 1337-3 (2018), incluye una formulación particular para un cálculo más preciso de $\varepsilon_{\alpha,d}$ en apoyos circulares: se comprueba que la diferencia entre la aplicación de la expresión vigente y la de la pre-norma es apreciable, siendo más conservadora la versión vigente. En adelante, en esta guía, se aplicará la expresión de prEN 1337-3.

$$\varepsilon_{\alpha,d} = \frac{D'^2 \cdot \alpha_{ab,d} \cdot t_i}{2 \sum t_i^3} = \frac{890^2 \cdot 0,00735 \cdot 20}{2 \cdot 12 \cdot 20^3} = 0,61$$

donde:

$$\alpha_{ab,d} = \sqrt{\alpha_{a,d}^2 + \alpha_{b,d}^2} = \sqrt{0,003^2 + 0,00671^2} = 0,00735 \text{ rad}$$

- **Deformación tangencial máxima de cálculo, $\varepsilon_{t,d}$ (apartado 8.2.3.4.2 de UNE-EN 15129; apartado 7.2 de esta guía):**

$$\varepsilon_{t,d} = K_L (\varepsilon_{c,E1} + \varepsilon_{q,max} + \varepsilon_{\alpha,d}) = 1 \cdot (0,94 + 1,00 + 0,61) = 2,55 \leq \frac{7,0}{\gamma_m} = 7,0$$

Se demuestra que cumple la limitación de $\varepsilon_{t,d} \leq 7,0/\gamma_m$ del apartado 8.2.3.4.2 de UNE-EN 15129, con un factor de seguridad adicional de $7,0/2,55 = 2,75$.

- **Deformación de tracción máxima (apartado 8.2.1.2.7 de UNE-EN 15129; apartado 7.3 de esta guía):**

No es de aplicación ya que en las pilas no se llegan a producir tracciones, razón por la cual se ha planteado un sistema de fijación no normalizada que no admite fuerzas verticales de tracción.

- **Espesor mínimo de las placas de zunchado de acero (apartado 5.3.3.5 de UNE-EN 1337-3; apartado 7.6 de esta guía):**

La verificación de este requisito es automática puesto que ya se ha demostrado en la *Guía para el cálculo de apoyos elastoméricos. Ejemplo de aplicación* [19] que las placas de 5 mm cumplen para la mayor carga vertical, que tiene en cuenta toda la sobrecarga de uso. Con fines didácticos, se muestra la comprobación para la hipótesis sísmica de cálculo III, que incluye un 30 % de la componente vertical de la acción sísmica actuando como compresión sobre el aislador. El espesor mínimo necesario debido a esta combinación sísmica es:

$$t_s = \frac{K_p \cdot N_{Ed,max} \cdot (t_1 + t_2) \cdot K_h \cdot Y_m}{A_r \cdot f_y} = \frac{1,3 \cdot 7.187 \cdot (20 + 20) \cdot 1 \cdot 1}{611.879 \cdot 235} 10^3 = 2,60 \text{ mm}$$

Se demuestra que cumple la limitación del apartado 5.3.3.5 de UNE-EN 1337-3 en situación sísmica, ya que se han dispuesto placas de 5 mm, con un factor de seguridad adicional de $5/2,60 = 1,92$.

- **Estabilidad al pandeo bajo acciones sísmicas (apartados 8.2.3.3.4 y 8.2.3.4.4 de UNE-EN 15129; apartado 7.4 de esta guía):**

Se obtiene la carga crítica para desplazamiento lateral nulo:

$$P_{cr} = \frac{\lambda \cdot G \cdot A_r \cdot a' \cdot S}{T_q} = \frac{1,3 \cdot 1,125 \cdot 611.612 \cdot 890 \cdot 11,13}{240} 10^{-3} = 36.909 \text{ kN}$$

El aislador es estable cuando se cumple que:

$$N_{Ed,max} < \frac{P_{cr}}{2} \rightarrow 7.187 < \frac{36.909}{2} = 18.451 \text{ kN}$$

como $N_{Ed,max} < P_{cr}/4 = 9.226 \text{ kN}$, se debe verificar:

$$\delta \leq 0,7 \rightarrow 0,27 \leq 0,7$$

donde δ depende de d_{max} :

$$\delta = \frac{d_{Ed}}{a'} = \frac{d_{max}}{D'} = \frac{241}{890} = 0,27$$

Se demuestra que cumple la limitación del apartado 8.2.3.4.4 con un factor de seguridad adicional de $0,7/0,27 = 2,59$.

- **Estabilidad de rodamiento bajo acciones sísmicas (apartados 8.2.3.4.5 de UNE-EN 15129; apartado 7.5 de esta guía):**

Esta comprobación debe realizarse únicamente en las pilas, ya que se plantean con una fijación no normalizada que no ancla la placa de extremo con la placa de anclaje frente a tensiones de tracción. Se debe verificar:

$$d_{max} \leq \frac{1}{\gamma_R} \frac{N_{Ed,min} \cdot a'}{(K_b T_b + N_{Ed,min})}$$

$$d_{max} = 174 \leq \frac{1}{1,5} \frac{7.187 \cdot 890}{(2.982 \cdot 320 \cdot 10^{-3} + 7.187)} = 522 \text{ mm}$$

Se demuestra que cumple la limitación del apartado 8.2.3.4.5 con un factor de seguridad adicional de $522/174 = 3,10$.

9.4.5.2 Comprobación completa de los aisladores frente a todas las hipótesis de cálculo

Se muestra a continuación el resumen de resultados de las comprobaciones de UNE-EN 15129 con propiedades DP, UBDP y LBDP frente a las hipótesis I, II, III y IV, es decir, todos los casos cuya respuesta se incluye en las tablas 36 y 37.

9.4.5.2.1 Aisladores de estribos

En la tabla 41 se muestra el resumen de comprobaciones de deformaciones tangenciales de acuerdo con las hipótesis de combinación sísmica, en donde se aprecia que los aisladores elastoméricos LDRB de los estribos cumplen con los requerimientos de UNE-EN 15129, estando además adecuadamente optimizados.

Tabla 41 Estribos. Resumen de comprobaciones de deformaciones tangenciales

Prop.	Hip.	A_r [mm ²]	d_{max} [mm]	$\varepsilon_{c,El}$	$\varepsilon_{q,d} \leq 2,5$		$\varepsilon_{\alpha,d}$	$\varepsilon_{t,d} \leq 7,0$		FS ^a
DP	I	235.935	271	0,36	2,05	< 2,5	0,45	2,86	< 7	1,22
	II	225.449	271	0,00	2,05	< 2,5	0,45	2,51	< 7	1,22
	III	223.391	316	0,30	2,39	< 2,5	0,45	3,15	< 7	1,04
	IV	223.391	316	0,14	2,39	< 2,5	0,45	2,99	< 7	1,04
UBDP	I	235.935	222	0,22	1,68	< 2,5	0,45	2,35	< 7	1,49
	II	225.449	222	0,00	1,68	< 2,5	0,45	2,14	< 7	1,49
	III	223.391	266	0,16	2,02	< 2,5	0,45	2,63	< 7	1,24
	IV	223.391	266	0,07	2,02	< 2,5	0,45	2,54	< 7	1,24
LBDP	I	235.935	273	0,48	2,07	< 2,5	0,45	3,00	< 7	1,21
	II	225.449	273	0,02	2,07	< 2,5	0,45	2,55	< 7	1,21
	III	223.293	314	0,40	2,38	< 2,5	0,45	3,24	< 7	1,05
	IV	223.293	314	0,22	2,38	< 2,5	0,45	3,05	< 7	1,05

^a FS: Factor de seguridad mínimo de las comprobaciones de deformaciones tangenciales.

En la tabla 42 se muestra el resumen de comprobaciones de limitación de tracciones mínimas y de espesores mínimos de placas de zunchado de acuerdo con las hipótesis de combinación sísmica. Se puede observar que se cumplen los criterios de UNE-EN 15129. Se reseña que, frente a la hipótesis que proporciona la menor reacción vertical (hipótesis II), con propiedades UBDP se alcanzan tensiones medias de tracción de $\sigma_m = 0,47$ MPa, inferiores a $2G_{UB} = 2$ MPa, y por tanto válidas según se indica en el apartado 7.3 de esta guía. Nótese que en realidad esta tensión de tracción no se produciría puesto que, para evitar tracciones en combinaciones de ELU no sísmicas, se ha dispuesto un tope anti-levantamiento (figura 23) cuya justificación de dimensionamiento puede contemplarse en la *Guía para el cálculo de apoyos elastoméricos. Ejemplo de aplicación* [19].

Tabla 42 **Estribos. Resumen de comprobaciones de tensiones medias de tracción y espesor mínimo de placa de zunchado**

Prop.	Comb.	$\sigma_m \leq N_{Ed,min} / A' \text{ a}$		$t_{s,min}$ [mm]	
Nominal	I	4,04	> -2G	2,00	< 4
	II	-0,10	> -2G	2,00	< 4
	III	3,21	> -2G	2,00	< 4
	IV	1,52	> -2G	2,00	< 4
UBDP	I	4,41	> -2G	2,00	< 4
	II	-0,47	> -2G	2,00	< 4
	III	3,16	> -2G	2,00	< 4
	IV	1,41	> -2G	2,00	< 4
LBDP	I	3,75	> -2G	2,00	< 4
	II	0,18	> -2G	2,00	< 4
	III	2,97	> -2G	2,00	< 4
	IV	1,61	> -2G	2,00	< 4

En la tabla 43 se muestra el resumen de comprobaciones de estabilidad. La comprobación de estabilidad frente al rodamiento no es aplicable en los aisladores de estribo, puesto que sus fijaciones se han establecido como normalizadas. No se produce incumplimiento de estabilidad según UNE-EN 15129, estando, de hecho, adecuadamente optimizados.

Tabla 43 Estribos. Comprobaciones de estabilidad

Prop.	Comb.	Pandeo		Rodamiento	
		P_{crit} [kN]	FS ^a	$d_{lim, rod}^b$ [kN]	FS ^a
Nominal	I	13.076	1,27	—	—
	II	12.495	1,27	—	—
	III	12.381	1,09	—	—
	IV	12.381	1,09	—	—
UBDP	I	23.513	1,55	—	—
	II	22.468	1,55	—	—
	III	22.263	1,29	—	—
	IV	22.263	1,29	—	—
LBDP	I	8.996	1,26	—	—
	II	8.596	1,26	—	—
	III	8.514	1,09	—	—
	IV	8.514	1,09	—	—

^a FS: Factor de seguridad mínimo de las comprobaciones de deformaciones tangenciales.

^b $d_{lim, rod}$: Desplazamiento límite $N_{Ed, min} \cdot a' / [\gamma_R \cdot (K_T \cdot T_b + N_{Ed, min})]$ para que se produzca inestabilidad por rodamiento.

A la vista de los resultados de las comprobaciones de UNE-EN 15129 que se muestran en las tablas 41, 42 y 43, se puede concluir que los aisladores elastoméricos de los estribos, dimensionados según UNE-EN 15129, cumplen con los requisitos de dicha norma, y, por tanto, son aptos.

9.4.5.2.2 Aisladores de pilas

En la tabla 44 se muestra el resumen de comprobaciones de deformaciones tangenciales de acuerdo con las hipótesis de combinación sísmica, en donde se aprecia que los aisladores elastoméricos LDRB de las pilas cumplen con los requerimientos de UNE-EN 15129, quedando además del lado de la seguridad. Esto es debido a que, para reducir el cortante basal, ha sido necesario disponer aisladores de gran altura en las pilas. Debido a ello, las deformaciones tangenciales que se producen no son muy elevadas y, sin embargo, se logra una gran reducción del cortante sobre la pila.

Tabla 44 Pilas. Resumen de comprobaciones de deformaciones tangenciales

Prop.	Comb.	A_r [mm ²]	d_{max} [mm]	$\varepsilon_{c,EI}$	$\varepsilon_{q,d} \leq 2,5$		$\varepsilon_{\alpha,d}$	$\varepsilon_{t,d} \leq 7,0$		FS ^a
Nominal	I	613.125	79	1,05	0,33	< 2,5	0.35	1,73	< 7	4,04
	II	621.135	70	0,56	0,29	< 2,5	0.39	1,20	< 7	5,84
	III	611.612	241	0,94	1,00	< 2,5	0.61	2,55	< 7	2,49
	IV	61.1612	241	0,75	1,00	< 2,5	0.65	2,38	< 7	2,49
UBDP	I	614.816	58	0,58	0,24	< 2,5	0.35	1,19	< 7	5,88
	II	621.313	50	0,31	0,21	< 2,5	0.42	0,87	< 7	8,07
	III	613.481	174	0,52	0,73	< 2,5	0.72	1,96	< 7	3,45
	IV	613.481	174	0,41	0,73	< 2,5	0.77	1,88	< 7	3,45
LBDP	I	612.324	84	1,53	0,35	< 2,5	0.35	2,23	< 7	3,13
	II	618.910	74	0,81	0,31	< 2,5	0.36	1,47	< 7	4,76
	III	610.633	255	1,36	1,06	< 2,5	0.50	2,92	< 7	2,35
	IV	610.633	255	1,09	1,06	< 2,5	0.54	2,67	< 7	2,35

^a FS: Factor de seguridad mínimo de las comprobaciones de deformaciones tangenciales.

En la tabla 45 se muestra el resumen de comprobaciones de limitación de tracciones mínimas y de espesores mínimos de placas de zunchado de acuerdo con las hipótesis de combinación sísmica, en donde se puede observar que se cumplen los criterios de UNE-EN 15129. Se reseña que en la pila en ningún caso se llegan a producir tracciones, por lo que el sistema de fijación no normalizada es válido.

Tabla 45 Pilas. Resumen de comprobaciones de tensiones medias de tracción y espesor mínimo de placa de zunchado

Prop.	Comb.	$\sigma_m \leq N_{Ed,min} / A'$ ^a		$t_{s,min}$ [mm]	
Nominal	I	13,06	> -2G	1,71	< 5
	II	6,98	> -2G	2,50	< 5
	III	11,55	> -2G	1,92	< 5
	IV	9,21	> -2G	2,41	< 5
UBDP	I	13,06	> -2G	1,71	< 5
	II	6,98	> -2G	2,50	< 5
	III	11,55	> -2G	1,93	< 5
	IV	9,21	> -2G	2,42	< 5
LBDP	I	13,06	> -2G	1,70	< 5
	II	6,98	> -2G	2,50	< 5
	III	11,55	> -2G	1,92	< 5
	IV	9,21	> -2G	2,41	< 5

En la tabla 46 se muestra el resumen de comprobaciones de estabilidad. En los aisladores de pilas sí debe verificarse la estabilidad frente al rodamiento, ya que sus fijaciones se han establecido como no normalizadas. No se produce incumplimiento de estabilidad según UNE-EN 15129.

Tabla 46 Pilas. Comprobaciones de estabilidad

Prop.	Comb.	Pandeo		Rodamiento	
		P_{crit} [kN]	FS ^a	$d_{lim, rod}$ ^b [kN]	FS ^a
Nominal	I	36.993	7,89	529	6,70
	II	37.477	8,90	483	6,91
	III	36.902	2,59	522	2,16
	IV	36.902	2,59	506	2,10
UBDP	I	66.706	10,74	487	8,40
	II	67.411	12,46	421	8,42
	III	66.561	3,58	476	2,73
	IV	66.561	3,58	453	2,60
LBDP	I	25.418	7,42	548	6,52
	II	25.692	8,42	513	6,93
	III	25.348	2,44	542	2,13
	IV	25.348	2,44	530	2,08

^a FS: Factor de seguridad mínimo de las comprobaciones de deformaciones tangenciales.

^b $d_{lim, rod}$: Desplazamiento límite $N_{Ed, min} \cdot a' / [\gamma_R \cdot (K_T \cdot T_b + N_{Ed, min})]$ para que se produzca inestabilidad por rodamiento.

A la vista de los resultados de las comprobaciones de UNE-EN 15129 que se muestran en las tablas 44, 45 y 46, se puede concluir que los aisladores elastoméricos de las pilas, dimensionados según UNE-EN 15129, cumplen con los requisitos de dicha norma, y, por tanto, son aptos.

9.5 Discusión sobre la consideración $d_{max, Tot}$ para la comprobación de los aisladores

En el apartado 7.1 se ha expuesto que tanto UNE-EN 15129 como UNE-EN 1998-2 establecen que la comprobación de desplazamiento máximo d_{max} debe hacerse en cada dirección principal y no con la suma vectorial de los desplazamientos máximos obtenidos en las dos direcciones ortogonales de la acción sísmica considerando cada componente del sismo por separado. Se han expuesto también las razones que justifican hacerlo de esta manera cuando se trata de cargas dinámicas. Se ha explicado también, en el apartado 7.1, que esta forma de calcular los desplazamientos es distinta de la que emplea UNE-EN 1337-3 para cargas estáticas (no sísmicas), consistente en la suma vectorial de valores máximos en dos direcciones

principales ortogonales. También es distinta de la forma que se indica en el apartado 7.6.2(6) de UNE-EN 1998-2 para comprobar si un apoyo elastomérico al que se le exige que cumpla UNE-EN 1337-3 pero no la norma UNE-EN 15129, puede emplearse como aislador sísmico de tipo “sencillo”.

Si la capacidad de desplazamiento horizontal máximo del aislador sin que cambien significativamente sus propiedades a la que se refiere el apartado 7.6.3(2) de UNE-EN 1998-2 es la misma en las dos direcciones principales horizontales, el desplazamiento horizontal d_{Ed} (o d_{max}) que gobierne el dimensionado o verificación del aislador será lógicamente el mayor de $d_{Ed,x}$ (o $d_{max,x}$) ó $d_{Ed,y}$ (o $d_{max,y}$). La dirección principal que gobierna el dimensionado o verificación del aislador será la longitudinal o la transversal del tablero, pero podría ser cualquier otra, por ejemplo, si el puente fuera curvo.

En el apartado 7.1 se ha hecho referencia al estudio realizado por B. Kolias, M. N. Fardis y A. Pecker en la referencia [25] y se han expuesto dos opciones que proponen estos autores para estimar de forma aproximada el desplazamiento máximo horizontal en la dirección de desplazamiento máximo, $d_{max,Tot}$, cuando actúan simultáneamente las dos componentes horizontales de la acción sísmica, a partir del desplazamiento máximo obtenido en cada dirección principal horizontal aplicando únicamente la componente de la acción sísmica en esa dirección. También se ha expuesto en 7.1 cómo se estimaría el desplazamiento máximo horizontal en la dirección de desplazamiento máximo cuando actúan simultáneamente las dos componentes horizontales de la acción sísmica aplicando la regla de combinación del apartado 4.3.3.5.2(4) de UNE-EN 1998-1.

Se muestran a continuación, en las tablas 47 y 48, las estimaciones del desplazamiento máximo horizontal en la dirección de máximo desplazamiento $d_{max,Tot}$ que se obtendrían con el puente de ejemplo de esta guía utilizando las dos opciones propuestas de la referencia [25] y aplicando la regla de combinación del apartado 4.3.3.5.2(4) de UNE-EN 1998-1. El cálculo se realiza con los aisladores definidos en el apartado 9.4 de esta guía, con propiedades nominales y sometidos a la hipótesis de cálculo III de combinación sísmica, que es la que produce los mayores desplazamientos en cada dirección principal horizontal y que valen $d_{max,x} = 316$ mm y $d_{max,y} = 282$ mm para los estribos, y $d_{max,x} = 241$ mm y $d_{max,y} = 232$ mm para las pilas.

Tabla 47 Estribos. Estimación del desplazamiento máximo en la dirección de máximo desplazamiento, $d_{max, Tot}$, empleando diferentes opciones

Descripción	$d_{max,x}$ [mm]	$d_{max,y}$ [mm]	$d_{max,Tot}$ [mm]
Opción 1 de la referencia [25]	387	353	387 ($d_{max} = d_{max,x}$)
Opción 2 de la referencia [25]	358	324	358 ($d_{max} = d_{max,x}$)
Apartado 4.3.3.5.2(4) de UNE-EN 1998-1 en la dirección de máximo desplazamiento	316	282	327

Tabla 48 Pilas. Cálculo de d_{max} con las diferentes propuestas alternativas

	Descripción	$d_{max,x}$ [mm]	$d_{max,y}$ [mm]	d_{max} [mm]
Opción 1 de la referencia [25]	Dirección principal más desfavorable + incremento de ordenadas del espectro por 1,25	300	291	300 ($d_{max} = d_{max,x}$)
Opción 2 de la referencia [25]	Dirección principal más desfavorable + incremento de d_{bd} por 1,15	276	367	276 ($d_{max} = d_{max,x}$)
Apartado 4.3.3.5.2(4) de UNE-EN 1998-1 en la dirección de máximo desplazamiento	Máximo de $\sqrt{d_{max,x}^2 + (0,3 \cdot d_{max,y})^2}$ $\sqrt{(0,3 \cdot d_{max,x})^2 + d_{max,y}^2}$	241	232	251

Los resultados mostrados en las tablas anteriores permiten extraer las siguientes conclusiones:

- Los desplazamiento máximos en la dirección de máximo desplazamiento, $d_{max,Tot}$, cuando actúan simultáneamente todas las componentes de la acción sísmica son obviamente mayores que los desplazamientos máximos en una dirección principal d_{max} cuando actúa sólo la componente del sismo en esa misma dirección. Concretamente, 13 % y 22 % superiores en estribos y 15 % y 24 % en pilas, en relación con las que las estimaciones de las opciones 1 y 2, respectivamente, de la referencia [25]. Los $d_{max,Tot}$ calculados con UNE-EN 1998-1 son aproximadamente un 4 % mayores que d_{max} .
- La opción 1 propuesta en la publicación [25], y que consiste en incrementar las ordenadas espectrales por un valor de 1,25, es la que proporciona un valor mayor de $d_{max,Tot}$ de entre las dos opciones de la publicación [25]. Concretamente, es un 18 % y un 20 % mayor que el $d_{max,Tot}$ que se obtiene con UNE-EN 1998-1 en estribos y pilas, respectivamente.
- La opción 2 propuesta en la publicación [25], y que consiste en incrementar los desplazamientos d_{bd} obtenidos en la dirección principal más desfavorable por un factor 1,15-1,25, proporciona un valor de $d_{max,Tot}$ que es un 9 % y un 10 % mayor que el $d_{max,Tot}$ que se obtiene con UNE-EN 1998-1 en estribos y pilas, respectivamente. Se trata de valores muy cercanos, si se tiene en cuenta la variabilidad e incertidumbres inherente a la acción sísmica. En la publicación [25] la opción 2 es la que proporcionaba un valor más próximo al que se obtiene mediante el cálculo dinámico directo, y es también la que utilizan los autores en las comprobaciones de los aisladores. En base a ello, se puede concluir que la estimación de $d_{max,Tot}$ aplicando la norma UNE-EN 1998-1 es adecuada y muy próxima a la que se obtendría mediante análisis en el dominio del tiempo.
- El valor de la deformación tangencial total, $\varepsilon_{q,max,Tot}$, debido a los desplazamiento máximos en la dirección de máximo desplazamiento, $d_{max,Tot}$, obtenido con las

estimaciones de la referencia [25] es $\varepsilon_{q,max,Tot} = 2,94$ para la opción 1 y $\varepsilon_{q,max,Tot} = 2,7$ para la opción 2. Con UNE-EN 1998-1 se obtiene $\varepsilon_{q,max,Tot} = 2,49$ que es inferior al valor límite de 2,5 para $\varepsilon_{q,max}$.

Aunque ni UNE-EN 15129 ni UNE-EN 1998-2 limiten el desplazamiento máximo en la dirección de máximo desplazamiento, $d_{max,Tot}$, el requisito no cuantificado del apartado 7.6.2.(3)P de UNE-EN 1998-2 que exige que los aisladores (como parte del sistema de aislamiento) puedan funcionar sin cambios significativos de sus propiedades hasta desplazamientos máximos en las direcciones principales de valor d_{max} , aconseja que en el caso de aisladores con la misma capacidad de desplazamiento lateral en todas las direcciones se compruebe que el desplazamiento máximo del aislador en la dirección de máximo desplazamiento calculada como se expone en este apartado 7.1 de esta guía no supere su capacidad de deformación lateral, lo cual es compartido por las conclusiones de [25], y se plantea como recomendación en esta guía. Es decir, que las comprobaciones de los aisladores resumidas en el apartado 7 se realicen para el $d_{max,Tot}$. Calculando este con la regla general de combinación de los efectos de las componentes de la acción sísmica del artículo 4.3.3.5.2(4) de UNE-EN 1998-1, como límite inferior, o bien con las opciones 1 o 2 de [25] si se desea ser más conservador.

10

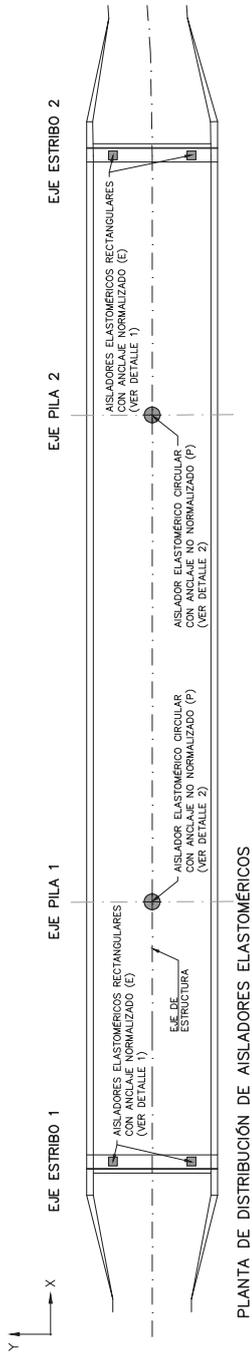
EJEMPLO DE PLANO DE DEFINICIÓN DE AISLADORES ELASTOMÉRICOS A INCLUIR EN EL PROYECTO

Los planos de aisladores elastoméricos de proyecto, según UNE-EN 15129, deben incluir, como mínimo, la siguiente información:

- Planta de la estructura con la distribución y definición de los tipos de aisladores a emplear.
- Dimensiones y composición de los dispositivos elastoméricos.
- Croquis esquemático de cada tipo de aislador.
- Definición de las cuñas de nivelación metálicas (si corresponde).
- Reacciones verticales, horizontales, desplazamientos y giros, en ELU (combinación no sísmica), para cada aislador. Estas reacciones, desplazamientos y giros deben indicarse para las hipótesis de:
 - Reacción vertical máxima ($F_{z,d,max}$)
 - Reacción vertical mínima ($F_{z,d,min}$)
 - Fuerza longitudinal máxima ($F''_{x,d,max}$)
 - Fuerza transversal máxima ($F''_{y,d,max}$)
 - Desplazamiento longitudinal máximo ($v'_{x,d,max}$)
 - Desplazamiento transversal máximo ($v'_{y,d,max}$)
 - Giro longitudinal máximo ($\alpha_{a,d,max}$)
 - Giro transversal máximo ($\alpha_{b,d,max}$)

- Los valores de fuerza longitudinal o transversal máxima, desplazamiento longitudinal o transversal máximo y giro transversal máximo obtenidos en las diferentes hipótesis pueden ser concomitantes con varios valores de reacción vertical, debido a los distintos valores que puede asumir la carga permanente: carga permanente máxima a T_0 o T_∞ , y carga permanente mínima a T_0 o T_∞ . Por sencillez, en la tabla de reacciones se podrán presentar los valores de reacciones, desplazamientos y giros únicamente para una de las situaciones de carga permanente (la más condicionante); no obstante, en el dimensionamiento de cualquier aislador elastomérico deben ser analizadas todas las hipótesis.
- Valores de cálculo necesarios para la definición de los ensayos de tipo y de control de producción en fábrica de los aisladores completos (véase la *Guía para el cálculo de aisladores elastoméricos de bajo amortiguamiento en zona sísmica* [20]). En particular:
 - $N_{Sd,ELS}$: reacción vertical máxima en ELS. Valor necesario para el *Ensayo de rigidez vertical a compresión*, en ensayos de tipo y de control de producción
 - $N_{Sd,ELU}$: reacción vertical máxima en ELU (combinación fundamental de las acciones conforme a UNE-EN 1990 cuando el desplazamiento horizontal aplicado sea cero). Valor necesario para el *Ensayo de capacidad a compresión bajo desplazamiento horizontal nulo*, en ensayos de tipo y de control de producción
 - $N_{Ed,max}$ y $N_{Ed,min}$: reacciones verticales máxima y mínima en combinación sísmica (o el valor medio de ambas si no difieren en más de un 20 %). Valores necesarios para el *Ensayo de capacidad horizontal bajo las cargas verticales máxima y mínima*, en ensayos de tipo
 - d_{bd} : desplazamiento sísmico horizontal de cálculo en una dirección principal. Valor necesario para obtener $\varepsilon_{q,E}$ para el *Ensayo de características horizontales bajo deformaciones cíclicas impuestas* y para el *Ensayo de rigidez horizontal bajo aplicación de carga monótona en rampa*, en ensayos de tipo y de control de producción
 - d_{max} y $\gamma_b d_{Ed}$ ($= \gamma_b d_{max}$): desplazamiento horizontal máximo y desplazamiento de cálculo aumentado. Valores necesarios para el *Ensayo de capacidad horizontal bajo las cargas verticales máxima y mínima*, en ensayos de tipo
 - T_U y T_L : límites superior e inferior del valor de la temperatura en servicio según UNE-EN 1991-1-5. Valores necesarios para el *Ensayo de variación de las características horizontales con la temperatura*, en ensayos de tipo
 - $\gamma_{Rd} \cdot F_{UB}$: cortante correspondiente al desplazamiento máximo incrementado por el factor de seguridad en aisladores, $\gamma_b d_{max}$ (o $\gamma_b d_{Ed}$), y con mayoración adicional por el coeficiente de sobrerresistencia $\gamma_{Rd} = 1,1$. Valor necesario para el dimensionamiento de los anclajes según el apartado 8.2.1.2.7 de UNE-EN 15129 (ver apartado ver apartado 9.4.3.2 de esta guía)
- Notas relativas a las características de los aisladores elastoméricos tenidas en cuenta en el cálculo.
- Notas relativas a las condiciones a cumplir y los cuidados a tener en la instalación de los aisladores.
- Notas relativas a las mesetas y/o cuñas de nivelación.

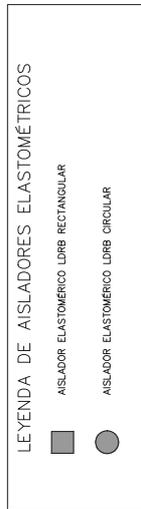
A continuación, se incluye un ejemplo de plano de los aisladores definidos en el apartado 9 de esta guía. La información incluida en el ejemplo corresponde a la información mínima a incluir en el plano de aisladores de proyecto. Cada proyecto particular podrá necesitar información complementaria específica.



PLANTA DE DISTRIBUCIÓN DE AISLADORES ELASTOMÉRICOS

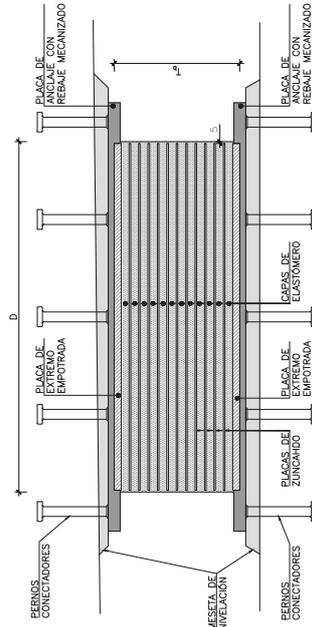
CUADRO DE DEFINICIÓN DE AISLADORES ELASTOMÉRICOS		COMPOSICIÓN DEL AISLADOR
EJE DE APOYO	TIPO DE AISLADOR	DIMENSIONES A x B x T ₁ (T ₂) D x T ₁ (T ₂)
E-1	RECTANGULAR	500x500x208(132) PLACA DE EXTREMO DE ACERO DE 18 mm + 11 CAPAS DE ELASTÓMERO DE 12 mm Y 10 PLACAS DE ZINCHADO DE ACERO DE 4 mm + PLACA DE EXTREMO DE ACERO DE 18 mm
P-1	CIRCULAR	900x320(240) PLACA DE EXTREMO DE ACERO DE 18 mm + 12 CAPAS DE ELASTÓMERO DE 10 mm Y 11 PLACAS DE ZINCHADO DE ACERO DE 5 mm + PLACA DE EXTREMO DE ACERO DE 18 mm
P-2	CIRCULAR	900x320(240) PLACA DE EXTREMO DE ACERO DE 18 mm + 12 CAPAS DE ELASTÓMERO DE 20 mm Y 11 PLACAS DE ZINCHADO DE ACERO DE 5 mm + PLACA DE EXTREMO DE ACERO DE 18 mm
E-2	RECTANGULAR	500x500x208(132) PLACA DE EXTREMO DE ACERO DE 18 mm + 11 CAPAS DE ELASTÓMERO DE 12 mm Y 10 PLACAS DE ZINCHADO DE ACERO DE 4 mm + PLACA DE EXTREMO DE ACERO DE 18 mm

LEYENDA:
 A [mm]: DIMENSIÓN LONGITUDINAL DEL AISLADOR ELASTOMÉRICO RECTANGULAR
 B [mm]: DIMENSIÓN TRANSVERSAL DEL AISLADOR ELASTOMÉRICO RECTANGULAR
 D [mm]: DIÁMETRO DEL AISLADOR ELASTOMÉRICO CIRCULAR
 T₁ [mm]: ESPESOR TOTAL DEL AISLADOR ELASTOMÉRICO
 T₂ [mm]: ESPESOR NETO DEL AISLADOR ELASTOMÉRICO

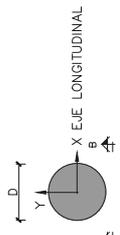


- NOTAS GENERALES:
1. LOS AISLADORES ELASTOMÉRICOS DEBERÁN CONTAR CON MARCADO CE Y ESTAR PROYECTADO Y FABRICADOS CONFORME A LA NORMA UNE-EN 15129 Y UNE-EN 1337.
 2. TODOS LOS AISLADORES DEBEN SER SUSTITUIBLES.
 3. CUALQUIER CAMBIO EN LA GEOMETRÍA EN PLANTA Y ESPESOR NETO TOTAL QUE NO AFECTE AL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DEL PUENTE, DEBERÁ VERIFICAR LA EFICACIA DE LA SUSTITUCIÓN.
 4. Y DE LA SUBESTRUCTURA HAN SIDO:
 - C_{conv} = 0,9 MPa (DEFORMACIONES LENTAS)
 - AMORTIGUAMIENTO DEL AISLADOR Y DEL SISTEMA ESTRUCTURA + AISLADOR: $\eta_{iso} = \eta_{sup} = 5\%$
 5. LOS AISLADORES SE DEBERÁN INSTALAR EN SUPERFICIES TOTALMENTE PLANAS Y DEBEN GARANTIZAR LA SUJECIÓN DE MESETAS DE NIVELACIÓN (VER NOTAS DE MESETAS DE NIVELACIÓN).
 6. EL SISTEMA DE ANCLAJE DEFINIDO EN ESTE PLANO ES ORIENTATIVO. EL SISTEMA DE ANCLAJE DE LOS AISLADORES DEBERÁ SER JUSTIFICADO POR EL SUMINISTRADOR DE LOS AISLADORES, DEBIENDO GARANTIZAR LA SUJECIÓN Y LA TRANSMISIÓN DE FUERZAS ENTRE TABLERO Y SUBESTRUCTURA.
 7. EL SISTEMA DE ANCLAJE DE LOS AISLADORES DEBERÁ GARANTIZAR LA SUSTITUCIÓN DE LOS MISMOS.
 8. SE DEBERÁN DEFINIR LOS REFUERZOS NECESARIOS PARA LA CORRECTA INSTALACIÓN DE LOS AISLADORES, EN LAS FUERZAS VERTICALES Y HORIZONTALES AL TABLERO Y EN LA SUSTITUCIÓN DE LOS MISMOS.
 9. SE DEBERÁ COMPROBAR EL ARMAZO LOCAL DE LAS MESETAS QUE SE VEA AFECTADO POR EL SISTEMA DE ANCLAJE PROPUUESTO.
 10. LAS PLACAS METÁLICAS QUE QUEDEN EXISTENTES A LA ATMÓSFERA DEBERÁN SER CONVENIENTEMENTE PROTEGIDAS (PINTURA, VULCANIZADO CON ELASTÓMERO, ACERO INOXIDABLE, ETC.).
 11. EL FABRICANTE DEBERÁ GARANTIZAR, MEDIANTE EL DEBIDO CERTIFICADO Y DE ACUERDO A LA NORMATIVA VIGENTE, LA VIDA ÚTIL DE LAS DIFERENTES PARTES DE LOS AISLADORES.

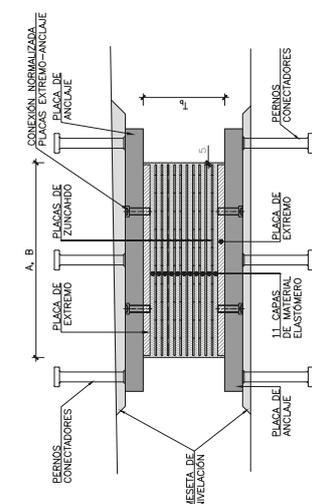
- NOTAS PARA LAS MESETAS DE NIVELACIÓN:
1. LAS MESETAS DE NIVELACIÓN DEBERÁN GARANTIZAR EL APOYO DE LAS PLACAS DE EXTREMO DE FORMA PLANA Y HORIZONTAL.
 2. TODAS LAS MESETAS SE EJECUTARÁN MEDIANTE UN GROUT DE ALTA RESISTENCIA (f_{cm} = 50 MPa A LAS 48 H), AUTONIVELANTE Y SIN RETRACCIÓN.
 3. LAS MESETAS QUE SUPEREN LOS 5 CM DE ALTURA DEBERÁN SER ARMADAS.
 4. EL SOBRESALIDILLO DE LAS MESETAS RESPECTO A LAS DIMENSIONES DEL AISLADOR DEBERÁ SER, COMO MÍNIMO, 1,5 VECES LA ALTURA DE ESTA.



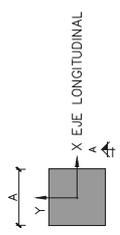
DETALLE 2: ALZADO DE AISLADOR ELASTOMÉRICO LDRB CIRCULAR CON ANCLAJE NO NORMALIZADO
 SIN ESCALA
 NOTA: CROQUIS ORIENTATIVO. LAS DIMENSIONES DE LOS AISLADORES SE DEFINEN EN EL CUADRO DE DEFINICIÓN DE AISLADORES ELASTOMÉRICOS



DETALLE 2 ESQUEMÁTICO EN PLANTA DE AISLADOR ELASTOMÉRICO CIRCULAR
 SIN ESCALA



DETALLE 1: ALZADO DE AISLADOR ELASTOMÉRICO LDRB RECTANGULAR CON ANCLAJE NORMALIZADO
 SIN ESCALA
 NOTA: CROQUIS ORIENTATIVO. LAS DIMENSIONES DE LOS AISLADORES SE DEFINEN EN EL CUADRO DE DEFINICIÓN DE AISLADORES ELASTOMÉRICOS



DETALLE 1 ESQUEMÁTICO EN PLANTA DE AISLADOR ELASTOMÉRICO RECTANGULAR
 SIN ESCALA

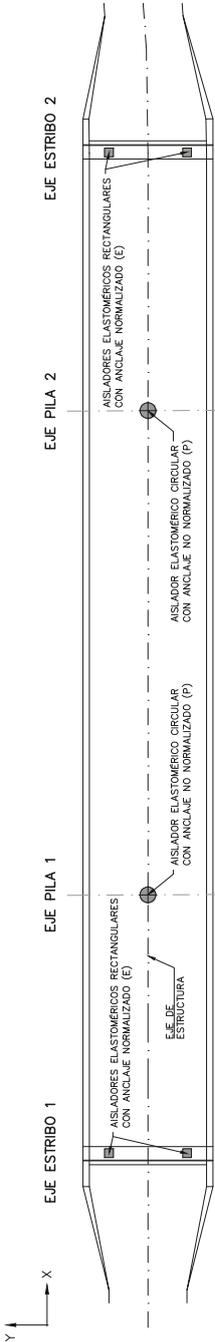


NOTAS PARA EL CUADRO DE DEFINICIÓN DE AISLADORES FRESNTE A RELACIONES NO SÍSMICAS:

- EL ESPESOR BRUTO (B) DE LOS AISLADORES ELASTOMÉRICOS CON ANCLAJE NORMALIZADO EN LAS PLACAS DE ANCLAJE DE LA ESTRUCTURA (VEASE EL DETALLE 1).
- EL ESPESOR BRUTO (L) DE LOS AISLADORES ELASTOMÉRICOS CON ANCLAJE NO NORMALIZADO NO TIENE EN CUENTA EL ESPESOR NO MECANIZADO DE LAS PLACAS DE ANCLAJE DE LOS AISLADORES A LA ESTRUCTURA (VEASE EL DETALLE 2).
- LOS MOVIMIENTOS IMPUESTOS, δ , NO INCLUYEN LAS DEFORMACIONES GENERADAS POR LAS FUERZAS HORIZONTALES, F_h .
- LAS FUERZAS HORIZONTALES, F_h , NO INCLUYEN LAS FUERZAS GENERADAS POR LAS DEFORMACIONES IMPUESTAS.

NOTA (L):

LOS VALORES DE CÁLCULO DE FUERZA LONGITUDINAL O TRANSVERSAL MÁXIMA, DESPLAZAMIENTO LONGITUDINAL O TRANSVERSAL MÁXIMO Y GIRO TRANSVERSAL MÁXIMO DEBEN SER COMPATIBLES CON VARIOS VALORES DE REACCIÓN VERTICAL MÁXIMA EN LOS DISTINTOS VALORES PERMANENTE MÍNIMA A, T_0 Y T_1 , POR SENCILLEZ, EN ESTE EJEMPLO SE EXPRIMEN LOS VALORES MÁXIMOS Y MÍNIMOS DE REACCIÓN VERTICAL MÁXIMA EN LOS DISTINTOS VALORES PERMANENTE MÍNIMA A, T_0 Y T_1 , SIN CONSIDERAR EL DESPLAZAMIENTO DE CUALQUIER AISLADOR DEBEN SER ANALIZADAS TODAS LAS HIPÓTESIS.



PLANTA DE DISTRIBUCIÓN DE AISLADORES ELASTOMÉRICOS

CUADRO DE DEFINICIÓN DE REACCIONES NO SÍSMICAS EN AISLADORES (E)

COMBINACIÓN DE ESTADO LIMITE ÚLTIMO	F_{ed} [kN]	F''_{sd} (long) [kN]	F''_{sd} (transv) [kN]	δ'_{sd} (long) [mm]	δ'_{sd} (transv) [mm]	ϕ''_{sd} (long) [mrad]	ϕ''_{sd} (transv) [mrad]
F_{ed} máx	2829,6	0,0	56,3	6,2	0,0	1,27	0,0
F_{ed} mín	-	-	-	-	-	-	-
F''_{sd} máx (longitudinal) (ver NOTA*)	1696,6	112,2	0,0	46,9	0,0	1,20	0,0
F''_{sd} máx (transversal) (ver NOTA*)	2030,3	0,0	93,9	35,0	0,0	1,79	0,0
δ'_{sd} máx (longitudinal) (ver NOTA*)	1726,5	0,0	0,0	54,8	0,0	0,77	0
δ'_{sd} máx (transversal) (ver NOTA*)	-	-	-	-	-	-	-
ϕ''_{sd} máx (longitudinal)	1742,2	0,0	0,0	39,1	0,0	6,07	0,0
ϕ''_{sd} máx (transversal) (ver NOTA*)	-	-	-	-	-	-	-

CUADRO DE VALORES PARA EL ENSAYO DE LOS AISLADORES (E) SEGUN UNE-EN 15129

TERMINO	(E)	(P)
$N_{k,ed}$ [kN]	965	8124
$N_{k,ed,u}$ [kN]	1351	12872
$N_{k,ed,m}$ [kN]	969	8124
$N_{k,m}$ [kN]	-25	4344
$\gamma_{k,F_{ed}}$ [kN]	1312	508
$\delta_{k,d}$ [mm]	187	151
$d_{k,ed}$ [mm]	316	241
$\gamma_{k,d}$ [mm]	363	277
T_0 [°C]	48	48
T_1 [°C]	-11	-11

CUADRO DE DEFINICIÓN DE REACCIONES NO SÍSMICAS EN AISLADORES (P)

COMBINACIÓN DE ESTADO LIMITE ÚLTIMO	F_{ed} [kN]	F''_{sd} (long) [kN]	F''_{sd} (transv) [kN]	δ'_{sd} (long) [mm]	δ'_{sd} (transv) [mm]	ϕ''_{sd} (long) [mrad]	ϕ''_{sd} (transv) [mrad]
F_{ed} máx	12871,6	0,0	85,8	8,9	0,0	2,44	5,41
F_{ed} mín	5040,5	0,0	143,0	2,1	0,0	1,54	2,33
F''_{sd} máx (longitudinal) (ver NOTA*)	5558,9	164,0	0,0	13,0	0,0	1,61	0,33
F''_{sd} máx (transversal) (ver NOTA*)	5081,4	0,0	143,0	8,9	0,0	2,25	2,33
δ'_{sd} máx (longitudinal) (ver NOTA*)	1921,0	0,0	0,0	15,7	0,0	0,94	2,19
δ'_{sd} máx (transversal) (ver NOTA*)	-	-	-	-	-	-	-
ϕ''_{sd} máx (longitudinal)	7611,1	0,0	0,0	10,3	0,0	5,89	2,12
ϕ''_{sd} máx (transversal) (ver NOTA*)	7610,0	0,0	85,8	8,9	0,0	2,62	7,88

LEYENDA DEL CUADRO DE DEFINICIÓN DE REACCIONES:

F_{ed} [kN]: REACCIÓN VERTICAL, EN ELU

F''_{sd} [kN]: REACCIÓN HORIZONTAL LONGITUDINAL, EN ELU (FUERZAS INSTANTÁNEAS)

F''_{sd} [kN]: REACCIÓN HORIZONTAL TRANSVERSAL, EN ELU (FUERZAS INSTANTÁNEAS)

δ'_{sd} [mm]: MOVIMIENTO IMPUESTO EN LA DIRECCIÓN LONGITUDINAL, EN ELU (DEFORMACIONES IMPUESTAS)

δ'_{sd} [mm]: MOVIMIENTO IMPUESTO EN LA DIRECCIÓN LONGITUDINAL, EN ELU (DEFORMACIONES IMPUESTAS)

ϕ''_{sd} [mrad]: GIRO SOBRE EL EJE X (GIRO TRANSVERSAL), EN ELU

ϕ''_{sd} [mrad]: GIRO SOBRE EL EJE Y (GIRO LONGITUDINAL), EN ELU

$N_{k,ed}$ [kN]: REACCIÓN VERTICAL MÁXIMA EN ELU

$N_{k,ed,u}$ [kN]: REACCIÓN VERTICAL MÁXIMA EN ELU

$N_{k,ed,m}$ [kN]: REACCIÓN VERTICAL MÁXIMA EN COMBINACIÓN SÍSMICA

$N_{k,m}$ [kN]: REACCIÓN VERTICAL MÁXIMA EN COMBINACIÓN SÍSMICA

$\gamma_{k,F_{ed}}$ [kN]: CORTANTE DE CÁLCULO DE ANCLAJES

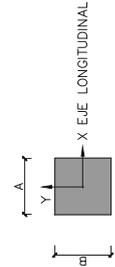
$d_{k,d}$ [mm]: DESPLAZAMIENTO SÍSMICO HORIZONTAL DE CÁLCULO

$d_{k,ed}$ [mm]: DESPLAZAMIENTO HORIZONTAL MÁXIMO DE CÁLCULO

$d_{k,m}$ [mm]: DESPLAZAMIENTO HORIZONTAL MÁXIMO DE CÁLCULO AUMENTADO

T_0 [°C]: TEMPERATURA MÁXIMA EN AISLADORES

T_1 [°C]: TEMPERATURA MÍNIMA EN AISLADORES



DETALLE 1 ESQUEMÁTICO EN PLANTA DE AISLADOR ELASTOMÉRICO RECTANGULAR SIN ESCALA



DETALLE 2 ESQUEMÁTICO EN PLANTA DE AISLADOR ELASTOMÉRICO CIRCULAR SIN ESCALA

11

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Eurocódigo UNE-EN 1998-1:2018, *Proyecto de estructuras sismorresistentes. Reglas generales, acciones sísmicas y reglas para edificios*, 2018.
- [2] Eurocódigo UNE-EN 1998-2:2018, *Proyecto de estructuras sismorresistentes. Puentes*, 2018.
- [3] UNE-EN 1337-3:2005, *Apoyos estructurales. Apoyos elastoméricos*, 2005.
- [4] UNE-EN 15129:2018, *Dispositivos antisísmicos*, 2018.
- [5] Sétra, *Laminated elastomeric bearing*. Ministère de L'Écologie du Développement et de L'Aménagement Durables, 2007.
- [6] AASHTO, *LRFD Bridge design specifications 5th ED*, 2010.
- [7] AASHTO, *Guide specifications for seismic isolation design*, 2010.
- [8] International Standard Organization, *Elastomeric Seismic-Protection Isolators, Part-1, Test Methods, ISO22762*, (2005).
- [9] Manterola J., *Puentes. Apuntes para su diseño, cálculo y construcción (2 volúmenes)*. Colegio de ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Madrid, 2006.
- [10] Skinner R. I., Kelly T. E., Robinson W. H. *Seismic isolation for designers and structural engineers*, Holmes Consulting Group, Wellington, N. Z., 2011.
- [11] Pascual, J., *Criterios de proyecto para el empleo de aparatos de apoyo de neopreno zunchado con núcleo de plomo en zonas sísmicas*, 1996, ACHE
- [12] Constantinou M. C., Michael, A. S. Whittaker, D. M. Fenz and G. Apostolakis: *Siesmic isolation of bridges*, 2007.

- [13] Kalpakidis, *Effects of heating and load history on the behavior of lead-rubber bearings*, Technical Report MCEER-08-0027. 2008.
- [14] Gent A. N., Lindley P. B. *The compression of bonded rubber blocks*. Proc.- Inst. Mech. 173 (3) pp. 111-122, Eng. 1959.
- [15] Kelly J.M. *Earthquake-Resistant Design with Rubber, 2nd Edition*. Springer-Verlag, London, 1997.
- [16] Medeot R, *Re-centering capability evaluation of seismic isolation systems based on energy concepts. Proceedings of the 13th world conference on earthquake engineering, 13th World Conference on Earthquake Engineering*. Vancouver, B. C., Canada. August 1-6, 2004. Paper N.º 3106.
- [17] Soong T. T., Dargush G.F. *Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering*, John Wiley & Sons, 1997.
- [18] Dirección General de Carreteras, *Serie Guías Eurocódigos: Guía para el cálculo de apoyos elastoméricos*. Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible. Secretaría General Técnica. Centro de Publicaciones, 2024.
- [19] Dirección General de Carreteras, *Serie Guías Eurocódigos: Guía para el cálculo de apoyos elastoméricos. Ejemplo de aplicación*. Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible. Secretaría General Técnica. Centro de Publicaciones, 2024.
- [20] Dirección General de Carreteras, *Serie Guías Eurocódigos: Guía para el cálculo de aisladores elastoméricos de bajo amortiguamiento en zona sísmica*. Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible. Secretaría General Técnica. Centro de Publicaciones, 2024.
- [21] Dirección General de Carreteras, *Serie Guías Eurocódigos: Guía para el Proyecto sísmico de puentes de Carretera*. Ministerio de Fomento. Secretaría General Técnica. Centro de Publicaciones, 2019.
- [22] Dirección General de Carreteras, *Recomendaciones para el proyecto y puesta en obra de los apoyos elastoméricos para puentes de carretera*. MOPU. Secretaría General Técnica. Servicio de Publicaciones. Segunda edición, 1982.
- [23] IGN, *Actualización de mapas de peligrosidad sísmica de España, de la web de IGME*: <https://www.ign.es/web/mapas-sismicidad>, 2015.
- [24] IGME, *QAFI: Quaternary Active Faults Database of Iberia*. Accessed "DATE", de la web de IGME: <https://info.igme.es/QAFI>, 2022.
- [25] Koliás B., Fardis, M. N., Pecker A., *Designers' guide to Eurocode 8: design of bridges for earthquake resistance*. ICE, 2012.
- [26] Fardis M. N., *Seismic design, assessment and retrofitting of concrete buildings based on Eurocode 8*, Springer, 2009.

