

SERIE GUÍAS EUROCÓDIGOS

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



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE TRANSPORTES
Y MOVILIDAD SOSTENIBLE

SECRETARÍA DE ESTADO
DE TRANSPORTES
Y MOVILIDAD SOSTENIBLE
SECRETARÍA GENERAL
DE TRANSPORTE TERRESTRE
DIRECCIÓN GENERAL
DE CARRETERAS

SERIE GUÍAS EUROCÓDIGOS

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



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: 196-25-047-7

NIPO: 196-25-046-1

Depósito Legal: M-18708-2024

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 miembro, 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 miembro "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

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* (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 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.

La UNE-EN 15129, Dispositivos antisísmicos, comprende los 11 capítulos siguientes, estando el dimensionamiento de los aisladores elastoméricos recogido en su capítulo 8:

- Capítulo 1: Objeto y campo de aplicación
- Capítulo 2: Normas para consulta
- Capítulo 3: Términos, definiciones, símbolos y abreviaturas
- Capítulo 4: Reglas generales de cálculo
- Capítulo 5: Dispositivos de unión rígida
- Capítulo 6: Dispositivos dependientes del desplazamiento
- Capítulo 7: Dispositivos dependientes de la velocidad
- Capítulo 8: Aisladores
- Capítulo 9: Combinación de dispositivos
- Capítulo 10: Evolución y verificación de la constancia de las prestaciones-EVCP
- Capítulo 11: Instalación

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* se recogen los requisitos de conformidad exigidos por la normativa para los apoyos completos y sus materiales constituyentes, así como las comprobaciones necesarias para el dimensionamiento de los aisladores. La *Guía para el cálculo de aisladores elastoméricos de bajo amortiguamiento en zona sísmica* es complementaria a la *Guía para el cálculo de apoyos elastoméricos* [19] y a las guías de ejemplos [20] [21], 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* 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 María Joao 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
2.3.1.1 Letras latinas en mayúsculas.....	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	20
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	21
2.3.3.3 Letras griegas	22
2.3.4 Símbolos particulares a efectos de esta guía.....	22
2.3.4.1 Letras latinas en mayúsculas.....	22
2.3.4.2 Letras latinas en minúsculas	23
2.3.4.3 Letras griegas	24
2.3.5 Notaciones y términos equivalentes entre normativas.....	24
2.4 Abreviaturas.....	25
3 AISLADORES SÍSMICOS ELASTOMÉRICOS. CONCEPTOS BÁSICOS.....	27
3.1 Definición y ámbito.....	27
3.2 Principio de funcionamiento.....	28
4 AISLADORES ELASTOMÉRICOS CONTEMPLADOS POR UNE-EN 15129	31
4.1 Tipos de aisladores elastoméricos según su nivel de amortiguamiento	33
4.2 Tipos de aisladores elastoméricos según el método de fijación.....	36

5 COMPONENTES DE LOS AISLADORES ELASTOMÉRICOS LDRB.....	39
5.1 Elastómeros.....	39
5.2 Placas de zunchado de acero y placas de extremo.....	40
6 REQUISITOS DE PROYECTO DE AISLADORES ELASTOMÉRICOS LDRB	41
6.1 Requisitos estructurales y mecánicos.....	42
6.1.1 Requisitos en el Estado Límite Último (ELU).....	42
6.1.2 Requisitos en el Estado Límite de Servicio.....	43
6.2 Requisitos de fiabilidad aumentada.....	43
6.3 Requisitos funcionales.....	44
6.4 Requisitos de conformidad.....	45
7 CÁLCULO ESTRUCTURAL DE AISLADORES ELASTOMÉRICOS LDRB.....	47
7.1 Metodología de análisis.....	47
7.2 Propiedades de cálculo.....	50
7.2.1 Parámetros geométricos.....	50
7.2.2 Factor de forma, S	53
7.2.3 Propiedades nominales de los materiales.....	53
7.2.3.1 Módulo de elasticidad transversal, G	54
7.2.3.2 Módulo de compresión, E_c	56
7.2.4 Propiedades nominales de los aisladores.....	57
7.2.4.1 Rigideces de cálculo de los aisladores sísmicos elastoméricos LDRB	57
7.2.4.2 Rigidez y amortiguamiento efectivos de cálculo en aisladores LDRB.....	58
7.2.5 Variabilidad de las propiedades de los aisladores (LBDP y UBDP).....	61
7.2.5.1 Estimación analítica de la variabilidad de las propiedades.....	65
7.2.6 Elastómeros en aisladores LDRB que se consideran sometidos a "acciones sísmicas pequeñas"	68
7.3 Comprobaciones.....	69
7.3.1 Combinaciones de acciones para las comprobaciones.....	69
7.3.1.1 Combinación sísmica de cálculo según UNE-EN 1990.....	69
7.3.1.2 Reacciones verticales y giros.....	70
7.3.1.3 Desplazamiento horizontal máximo d_{max}	71
7.3.2 Deformación tangencial máxima de cálculo.....	73
7.3.2.1 Deformación tangencial de cálculo debida a la carga de compresión, $\varepsilon_{c,El}$	75
7.3.2.2 Deformación tangencial debida al desplazamiento horizontal, $\varepsilon_{q,max}$	75
7.3.2.3 Deformación tangencial debida a la rotación angular de eje horizontal, $\varepsilon_{\alpha,d}$	76

7.3.3	Deformación de tracción máxima.....	77
7.3.4	Espesor de las capas de elastómero	78
7.3.5	Espesor mínimo de las placas de zunchado de acero.....	78
7.3.6	Comprobaciones de criterios de estabilidad	79
7.3.6.1	Estabilidad a pandeo o flexión lateral bajo acciones sísmicas	80
7.3.6.2	Estabilidad de rodamiento bajo acciones sísmicas.....	81
7.3.7	Dimensionamiento de uniones y anclajes.....	82
7.3.8	Dimensionamiento de la subestructura.....	83
7.3.9	Capacidad de recentrado	84
7.3.10	Rigidez vertical mínima	85
7.3.11	Predimensionamiento.....	85
8	CONFORMIDAD DE LOS AISLADORES ELASTOMÉRICOS FABRICADOS.....	87
8.1	El mercado CE.....	87
8.2	Aisladores elastoméricos completos.....	91
8.2.1	Requisitos a cumplir por los aisladores elastoméricos	91
8.2.1.1	Requisitos generales	91
8.2.1.2	Requisitos de funcionamiento a verificar mediante ensayos	91
8.2.2	Ensayos a realizar a un aislador según UNE-EN 15129	96
8.2.2.1	Ensayos de tipo.....	97
8.2.2.2	Ensayos de control de producción en fábrica	102
8.2.2.3	Resumen de ensayos de tipo y de control de producción	104
8.2.2.4	Métodos y equipo de ensayo.....	106
8.3	Materiales.....	106
8.3.1	Requisitos a cumplir por el material elastómero.....	106
8.3.2	Ensayos a realizar al elastómero según UNE-EN 15129	109
8.3.2.1	Ensayos de tipo.....	110
8.3.2.2	Ensayos de control de producción en fábrica	111
8.3.2.3	Resumen de ensayos de tipo y de control de producción	111
8.3.3	Placas de zunchado de acero	112
9	EJEMPLO DE PLANO DE DEFINICIÓN DE AISLADORES ELASTOMÉRICOS A INCLUIR EN PROYECTO.....	113
10	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	119

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 también se pretende enfatizar la importancia de garantizar, mediante la realización de una serie de ensayos por parte del fabricante, que el apoyo y los materiales que lo componen cumplan con los requisitos de conformidad exigidos por la norma para el marcado CE y que permiten garantizar el correcto funcionamiento de este.

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* [19], en donde se explica con detalle cómo aplicar la normativa.

Aunque la mayor parte de los criterios y procedimientos recogidos en esta guía pueden ser aplicables a cualquier tipo de estructura analizada, su ámbito de aplicación son las obras de carretera.

1.2 Contenido de la guía

Esta guía se estructura en diez 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 los capítulos 3, 4 y 5 se define conceptualmente el funcionamiento de los aisladores elastoméricos, se establece su clasificación en función del tipo de anclaje y del tipo de aislador (LDRB, HDRB, LRB y PPRB), y se particulariza para los aisladores elastoméricos de bajo amortiguamiento (LDRB), definiendo sus componentes en el capítulo 5.

En el capítulo 6 se tratan los requisitos que obliga UNE-EN 15129 para el proyecto de aisladores elastoméricos. Conceptos como la necesidad de fiabilidad aumentada, la obligatoriedad del anclaje de los dispositivos o la exigencia de que sean sustituibles son abordados en este capítulo.

El cálculo estructural, ya sea a nivel de metodología o de comprobaciones particulares de deformaciones tangenciales y estabilidad, se desarrolla en el capítulo 7. Este capítulo, de carácter práctico, se considera fundamental para el predimensionamiento y cálculo de los aisladores en fase de proyecto.

El contenido del capítulo 8 detalla los requisitos que deben cumplir tanto los apoyos como sus materiales constituyentes para garantizar la atribución del marcado CE, así como los ensayos que se deben realizar. El capítulo tiene una gran relevancia para el proyecto, ya que establece los valores que se deben aportar en proyecto para la realización de los ensayos.

En el capítulo 9 se incluye un ejemplo de la información que deberá contener el plano de apoyos de un proyecto, imprescindible para una adecuada selección de los apoyos por parte del fabricante.

Finalmente, en el capítulo 10 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 1998-1: Eurocódigo 8. Proyecto de estructuras sismorresistentes. Parte 1: Reglas generales, acciones sísmicas y reglas para edificación
- UNE-EN 1998-2: Eurocódigo 8. Proyecto de estructuras sismorresistentes. Parte 2: Puentes
- UNE-EN 1337-1: Apoyos estructurales. Parte 1: Reglas generales de proyecto
- UNE-EN 1337-3: Apoyos estructurales. Parte 3: Apoyos elastoméricos

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

- UNE-EN 1990:2019: Eurocódigos. Bases de cálculo de estructuras
- UNE-EN 1991: Eurocódigo 1. Acciones en estructuras. Todas las partes
- 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.
- *Aislador*: dispositivo que posee las características necesarias para realizar el aislamiento sísmico.
- *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.
- *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 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.
- *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 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 que experimenta un aislador elastomérico, en una dirección principal, incluyendo todos los efectos de las acciones y la aplicación de 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 inherente de la estructura, ξ* : valor de la fracción de amortiguamiento de tipo viscoso inherente de la estructura, que es debido a diversos fenómenos conjuntos como la fisuración, pequeñas plastificaciones o la interacción suelo-estructura, entre otros.
- *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 desplazamientos impuestos de tipo cíclico (viscoso o histerético) provocados por la acción sísmica.
- *Energía disipada, E_D* : energía disipada en cada ciclo de histéresis. En general, correspondiente al área encerrada por las curvas fuerza-desplazamiento de un ciclo de histéresis.
- *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 o de rutina (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 en 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. En un aislador sin agujeros, $A_I = A'$ [m ²] |

A_r	área en planta efectiva reducida del aislador elastomérico calculada únicamente con las acciones no sísmicas mediante las ecuaciones (4) y (5), y excluyendo siempre el área de posibles perforaciones, tanto si están rellenas como si no [m ²]
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]
$E_{I,c}$	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]
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]
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]
$T_{eff,b}$	periodo efectivo del aislador [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]
$T_{min,b}$	temperatura mínima del aislador para la situación sísmica de cálculo, correspondiente al emplazamiento del puente, según el apartado J.1(2) del Anejo Nacional español de UNE-EN 1998-2 [°C]
V_{bd}	fuerza sísmica horizontal de cálculo correspondiente al desplazamiento d_{bd} [kN/m]
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 zunchado) [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 zunchado) [m]
a_l	anchura efectiva (anchura de las plazas de zunchado) 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]
$(d_{Ed})_{UB}$	valor de d_{Ed} de un aislador elastomérico, calculado con el límite superior de sus propiedades mecánicas [m]
$(d_{Ed})_{LB}$	valor de d_{Ed} de un aislador elastomérico, calculado con el límite inferior de sus propiedades mecánicas [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]
k_R	factor de forma para la rigidez al giro en aisladores elastoméricos rectangulares
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

$\varepsilon_{c,E}$	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
$\varepsilon_{i,d}$	deformación tangencial de cálculo nominal en 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	coeficiente parcial para la resistencia del material elastómero
γ_R	coeficiente 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]
$F_{z,d}$	fuerza vertical de cálculo [kN]
G_g	módulo de elasticidad transversal convencional aparente o módulo de cizalla convencional, 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 del aislador elastomérico [m]
t_1, t_2	espesores de las capas de material elastómero a cada lado de una placa de zunchado [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]
$v_{y,d}$	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]
$v_{xy,d}$	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]
$\varepsilon_{q,d}$	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

E_D	energía disipada por ciclo [kJ o kNm]
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]

2.3.3.2 Letras latinas en minúsculas

a_{vg}	aceleración vertical de cálculo según el apartado 3.2.2.3 de UNE-EN 1998-1
$d_{bi,a}$	desplazamiento sísmico horizontal de cálculo de un aislador elastomérico debido al sismo de cálculo o terremoto de proyecto incrementado por γ_x (simplificado a d_{ba} en esta guía) [m]

$d_{bi,d}$	desplazamiento sísmico de cálculo de un aislador (igual a d_{bd} en UNE-EN 15129) [m]
d_{cd}	desplazamiento sísmico de cálculo respecto del suelo (desplazamiento en el centro de rigidez de la superestructura) [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 una dirección principal [m]
$d_{m,i}$	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
γ_I	coeficiente de importancia
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
η	coeficiente corrector de amortiguamiento
η_{eff}	coeficiente corrector de amortiguamiento correspondiente a la fracción de amortiguamiento efectivo del sistema

2.3.4 Símbolos particulares a efectos de esta guía

2.3.4.1 Letras latinas en mayúsculas

F_h	fuerza horizontal sobre el aislador elastomérico para el cálculo de rigideces [kN]
H	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_β	rigidez torsional del aislador elastomérico frente a acciones verticales [kNm/rad]

N	fuerza vertical sobre el aislador elastomérico para el cálculo de rigideces [kN]
M	momento de eje horizontal sobre el aislador elastomérico para el cálculo de rigideces [kNm]
T	momento de eje vertical sobre el aislador elastomérico para el cálculo de rigideces [kNm]
$V_{bd,UB}$	fuerza sísmica de cálculo obtenida con el límite superior del valor de las propiedades mecánicas del aislador elastomérico (igual a F_{UB} en UNE-EN 15129) [kN]
$V_{bd,LB}$	fuerza sísmica de cálculo calculada con el límite inferior del valor de las propiedades mecánicas del aislador elastomérico (igual a F_{LB} en UNE-EN 15129) [kN]
$V_{d,min}$	cortante sísmico de cálculo mínimo, correspondiente al desplazamiento $d_{cd,min}$ [kN]
V_G	fuerza horizontal inicial debida a acciones no sísmicas, correspondiente al desplazamiento d_G [kN]

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 de la superestructura) [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_{∞}	desplazamiento horizontal debido a efectos diferidos [m]
d_T	desplazamiento horizontal por acciones térmicas [m]
m	masa aislada de la superestructura [T]
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_{xy}	desplazamiento horizontal del aislador debido a F_h para el cálculo de rigideces [m]
v_z	desplazamiento vertical del aislador debido a N para el cálculo de rigideces [m]

2.3.4.3 Letras griegas

β	rotación angular de eje vertical para el cálculo de rigideces [rad]
θ	rotación angular de eje horizontal para el cálculo de rigideces [rad]
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 predimensionamiento
ξ_{eff}	fracción de amortiguamiento efectivo del sistema de aislamiento

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 1 Equivalencia de símbolos

Término	Guía	UNE-EN 15129	UNE-EN 1337	UNE-EN 1998-2
Desplazamiento horizontal a largo plazo debido a las acciones permanentes y cuasi-permanentes	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	$G^{(1)}$	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	—

⁽¹⁾ 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 7.2.3.1 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 2 Equivalencia de términos

Parámetro	Guía	UNE-EN 15129	UNE-EN 1337	UNE-EN 1998-2	Otros términos típicos
G	Módulo de elasticidad transversal	Coefficiente 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 esta guía)

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 alta amortiguación (*High Damping Rubber Bearing*)
- LDRB: aislador elastomérico de baja amortiguación (*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

AISLADORES SÍSMICOS ELASTOMÉRICOS. CONCEPTOS BÁSICOS

3.1 Definición y ámbito

Un apoyo elastomérico es un dispositivo de conexión entre dos elementos estructurales, constituido generalmente por capas alternas de elastómero y de acero.

Los apoyos elastoméricos deben diseñarse y fabricarse para acomodar movimientos de traslación y rotación en cualquier dirección y sobre cualquier eje y permitir, así, la adecuada transmisión de fuerzas y entre dos elementos. Adicionalmente, pueden comprobarse o diseñarse con características especiales para cumplir funciones de aislamiento y disipación de la energía introducida por un sismo mediante mecanismos de amortiguamiento viscoso, adquiriendo así la categoría de aisladores elastoméricos, que es el nombre con el que se les designará en esta guía.

Dentro de la categoría de los aisladores elastoméricos, estos pueden diferenciarse según si presentan un nivel de amortiguamiento bajo ($\xi_{eff,b} \leq 6\%$) o alto. En esta guía se desarrollan fundamentalmente los aisladores elastoméricos de bajo amortiguamiento (LDBR, *Low Damping Rubber Bearings*), que son apoyos elastoméricos de tipo convencional pero cuyas prestaciones frente a acciones sísmicas deben quedar garantizadas. Este tipo de aisladores en puentes de carretera se consideran, salvo casos particulares, adecuados para resistir las aceleraciones sísmicas de cálculo dentro la geografía española según se definen en el *Mapa de peligrosidad sísmica de España* emitido por el IGN [24].

Las características, propiedades y fundamentos de cálculo de los aisladores elastoméricos para uso frente a acciones no sísmicas, vienen ampliamente desarrolladas en la *Guía para el cálculo de apoyos elastoméricos* [19], cuyos conceptos desarrollados toman como base los criterios adoptados por UNE-EN 1337.

Las características, propiedades y fundamentos de cálculo de los aisladores elastoméricos para uso como sistema de protección frente a terremotos, se desarrollan en la presente guía a partir de los preceptos reflejados en UNE-EN 15129 [4] y UNE-EN 1998 [1] [2], cumpliendo adicionalmente lo dispuesto en la UNE-EN 1337, siempre que las dos anteriores no lo particularicen. La metodología de cálculo sísmico de puentes de carretera en base a los Eurocódigos se desarrolla en la *Guía para el proyecto sísmico de puentes de carretera* [22].

En toda la guía, cuando se haga referencia a la acción sísmica del terremoto de proyecto, a la acción sísmica del terremoto de referencia, a la acción sísmica de cálculo o al sismo de cálculo, debe entenderse como aquel nivel de la acción sísmica para el cual la respuesta de un puente de clase de importancia II (coeficiente de importancia $\gamma_I = 1$) según UNE-EN 1998-2 (correspondiente a la clase de consecuencia CC2 en UNE-EN 1990), no rebasa el estado límite de no colapso definido en el artículo 2.2.2 de UNE-EN 1998-2. Este nivel de la acción sísmica está asociado a un periodo de retorno que fija cada país en su Anejo Nacional, siendo el valor recomendado por UNE-EN 1998 y el Anejo Nacional español de 475 años.

3.2 Principio de funcionamiento

Los aisladores elastoméricos se colocan a un determinado nivel de la estructura para aislar la masa de la estructura situada por encima de este nivel (superestructura) de la estructura situada por debajo (subestructura), modificando así las propiedades dinámicas de la estructura para mejorar la respuesta en caso de un sismo. Este aislamiento se logra mediante una combinación de los siguientes efectos:

- **Efecto de aislamiento:** aumento del periodo fundamental de vibración del sistema estructural completo con el fin de situarlo en una zona del espectro elástico de respuesta del terremoto donde las aceleraciones espectrales sean menores (figura 1). Esto se traduce en una disminución de las fuerzas sísmicas transmitidas a la subestructura, pero también en un aumento de los desplazamientos relativos entre la superestructura y la subestructura.

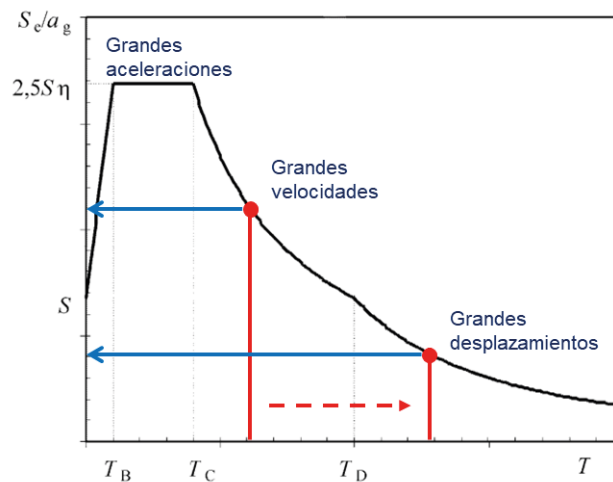


Figura 1 Efecto de aislamiento

- **Efecto de disipación:** aumento de la capacidad de disipación de energía del sistema estructural completo a través de un mecanismo de amortiguamiento de tipo viscoso. Ello da lugar a una disminución de las aceleraciones espectrales del espectro elástico de respuesta del terremoto, que se traduce en una reducción de fuerzas y de desplazamientos. En aisladores elastoméricos de bajo amortiguamiento (LDRB), esta reducción prácticamente no se materializa en el cálculo, ya que su amortiguamiento efectivo ($\xi_{eff,b} \leq 6\%$) será próximo al amortiguamiento del 5% que considera la formulación de los espectros elásticos de respuesta según el apartado 3.2.2.2 de UNE-EN 1998-1.

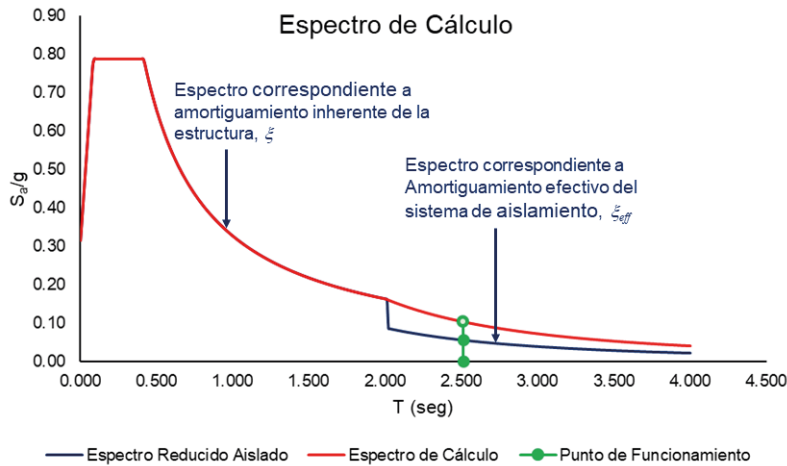


Figura 2 Efecto de disipación por amortiguamiento

El funcionamiento de los aisladores elastoméricos se basa en su comportamiento constitutivo no lineal. De manera simplificada, responden a una primera rama de carga rígida en comparación con una segunda rama más deformable tras la que se alcanzan grandes desplazamientos frente a reducidos incrementos de fuerza lateral. La descarga se produce de la misma forma que la fase de carga, generando así un ciclo de deformación que es causante de la disipación de energía. El cambio de rigideces transversales en las fases de carga y descarga, que se materializa en una variación del módulo de elasticidad transversal G_g , es atribuible a un ablandamiento de los componentes elastoméricos del aislador por acumulación de calor frente a cargas dinámicas cíclicas [10]. En el caso de los aisladores elastoméricos de bajo amortiguamiento (LDRB), la variación experimentada por el módulo de elasticidad transversal es muy reducida, por lo que los ciclos de deformación resultantes son muy esbeltos y la disipación es limitada.

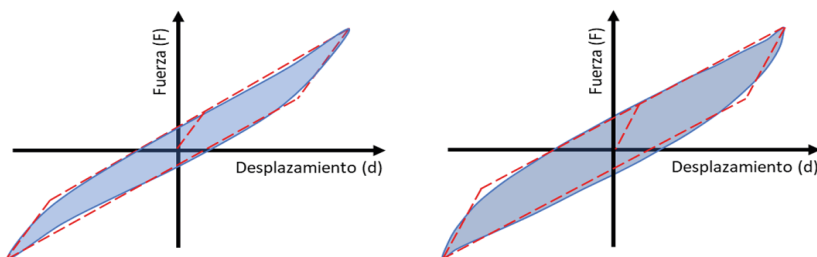


Figura 3 Ejemplo esquemático de un ciclo de deformación de un LDRB (izquierda) frente al de un aislador de alto amortiguamiento HDRB (derecha)

Para la comprobación de aisladores elastoméricos deberá garantizarse que este dispositivo es capaz de resistir las fuerzas y desplazamientos demandados por la combinación sísmica de cálculo (apartado 2.1 de UNE-EN 1998-1), según UNE-EN 15129. Adicionalmente, deberán ser capaces de resistir las situaciones de cálculo no sísmicas, de acuerdo con el resto de Eurocódigos y con la norma específica de apoyos elastoméricos UNE-EN 1337-3.

Dado que uno de los objetivos de proyectar puentes con aisladores elastoméricos es evitar o minimizar el daño en la subestructura frente a los episodios sísmicos, 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. Por ello, UNE-EN 1998-2 (apartados 7.3(2)P y 7.6.3(2)) limita la ductilidad de la subestructura y la superestructura a valores correspondientes a un factor de comportamiento $q \leq 1,5$, es decir, de "ductilidad limitada" o "esencialmente elástica". 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 de 1,5. La denominación de "ductilidad limitada" para las estructuras con $1 < q \leq 1,5$ puede conducir a confusiones, ya que el valor $q = 1,5$ está realmente asociado a la sobrerresistencia de la estructura, y no a su capacidad de deformación plástica mediante la formación de rótulas plásticas. Así mismo, también se indica, en el apartado 5.8.2(2)P, que las cimentaciones deberán permanecer elásticas con sobrerresistencia incluida, es decir, manteniendo $q = 1,0$.

Comentario: En la segunda generación del Eurocódigo 8 este concepto queda más claro al definirse el factor q como producto de tres términos $q = q_s q_R q_d$ denominados factor de sobrerresistencia, factor de redistribución plástica y factor de ductilidad. El primero q_s debe ser menor o igual que 1,5, y sólo los otros dos están relacionados con la formación de rótulas plásticas en la estructura.

4

AISLADORES ELASTOMÉRICOS CONTEMPLADOS POR UNE-EN 15129

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 4 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:

Comentario: en general, es preferible la utilización de aisladores elastoméricos de planta circular, ya que, para una misma rigidez horizontal (misma área en planta y misma altura total de material elastómero), los circulares aportan una menor rigidez al giro de eje horizontal (comportamiento más asimilable a una rótula). Además, las esquinas de los aisladores rectangulares son más propensas a presentar problemas de vulcanizado.

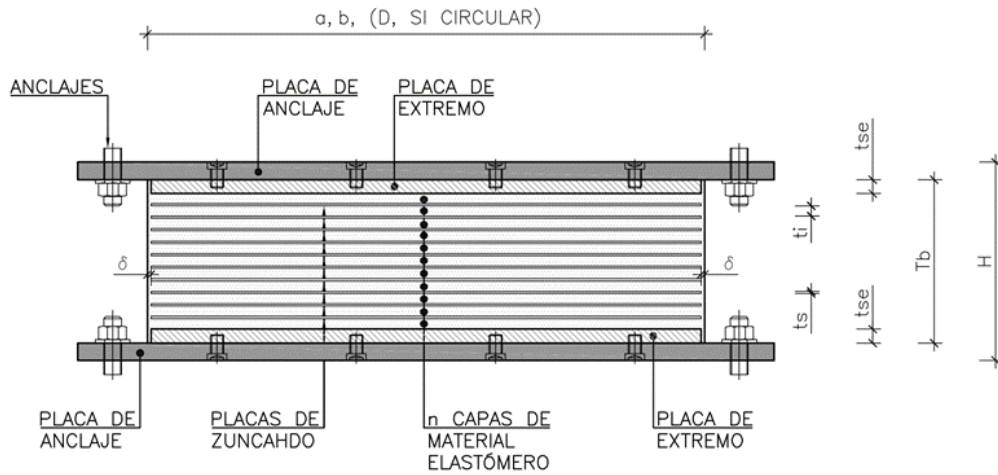


Figura 4 Alzado tipo de aislador elastomérico LDRB normalizado con unión atornillada de las placas de extremo a las placas de anclaje

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_s espesor de la placa de zunchado interior
- t_{se} espesor de las placas de extremo
- n número de capas interiores de material elastómero
- δ espesor de recubrimiento lateral mediante material elastómero
- T_q 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

$$T_q = n \cdot t_i \quad (1)$$

$$T_b = n \cdot t_i + (n - 1)t_s + 2t_{se} \quad (2)$$

4.1 Tipos de aisladores elastoméricos según su nivel de amortiguamiento

Los tipos de aisladores elastoméricos cubiertos por UNE-EN 15129 son:

Aisladores elastoméricos de bajo amortiguamiento (LDRB): son los aisladores que se desarrollan de forma extensa en esta guía. Están constituidos por capas vulcanizadas de material elastómero y placas de acero, y producen fracciones de amortiguamiento (simplemente amortiguamiento en adelante) relativamente bajas, generalmente en torno al 2-6 %. El apartado 8.2.1.1 de UNE-EN 15129 (y el 7.5.2.3.3 de UNE-EN 1998-2) considera que los aisladores son de tipo LDRB cuando el amortiguamiento efectivo del elastómero es $\xi_{eff,b} \leq 6\%$. Sus principales ventajas son su sencillez, facilidad de fabricación y, en algunos casos, menor requerimiento de ensayos especiales para su validación y control de calidad que en el resto de los aisladores elastoméricos. Las propiedades elásticas del elastómero facilitan su recentrado tras el episodio sísmico.

Los aisladores elastoméricos de bajo amortiguamiento (LDRB) pueden emplearse en cualquier escenario de sismicidad, aunque si esta es de moderada a alta puede ser necesario combinarlos con dispositivos complementarios (disipadores de energía) que suplan su insuficiente capacidad para disipar la energía introducida por el terremoto.

La norma UNE-EN 15129 realiza una distinción en los aisladores LDRB según el concepto de aislador sometido a "acciones sísmicas pequeñas". El nombre puede llevar a confusión porque da la impresión de que está directa y únicamente relacionado con la peligrosidad sísmica del lugar, cuando en realidad depende del cumplimiento de unas condiciones en desplazamientos y fuerzas que establece UNE-EN 15129 en el apartado 8.2.1.1. Cuando se considera que el LDRB está sometido a "acciones sísmicas pequeñas" bajo el terremoto de proyecto (y el LDRB satisface por lo tanto las dos limitaciones que se indican más abajo para poder aceptar tal consideración), se exime a los LDRB 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, respectivamente. La norma UNE-EN 15129 (artículo 8.2.1.1) entiende que el LDRB está sometido a "acciones sísmicas pequeñas" bajo el sismo de cálculo cuando se cumplen las dos condiciones siguientes:

- El desplazamiento horizontal sísmico de cálculo en una dirección principal, d_{bd} , es inferior al desplazamiento debido a acciones no sísmicas (no mayoradas), d_G , según se define en los apartados 7.6.2(2) de UNE-EN 1998-2 y 8.1 de UNE-EN 15129, y según se desarrolla en el apartado 7.3.1 de esta guía. Para el análisis de esta condición, d_{bd} se debe obtener con el límite inferior de propiedades, $d_{bd,LB}$, obtenidas según el apartado 7.2.5 de esta guía.
- La fuerza sísmica horizontal máxima de cálculo, V_{bd} , es inferior a la fuerza horizontal debida a acciones no sísmicas (no mayoradas), V_G , según la combinación que se define para desplazamientos en los apartados 7.6.2(2) de UNE-EN 1998-2 y 8.1 de UNE-EN 15129.

Comentario: para el análisis de la 1.^a condición, 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 2.^a condición, 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 7.2.3.1 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.

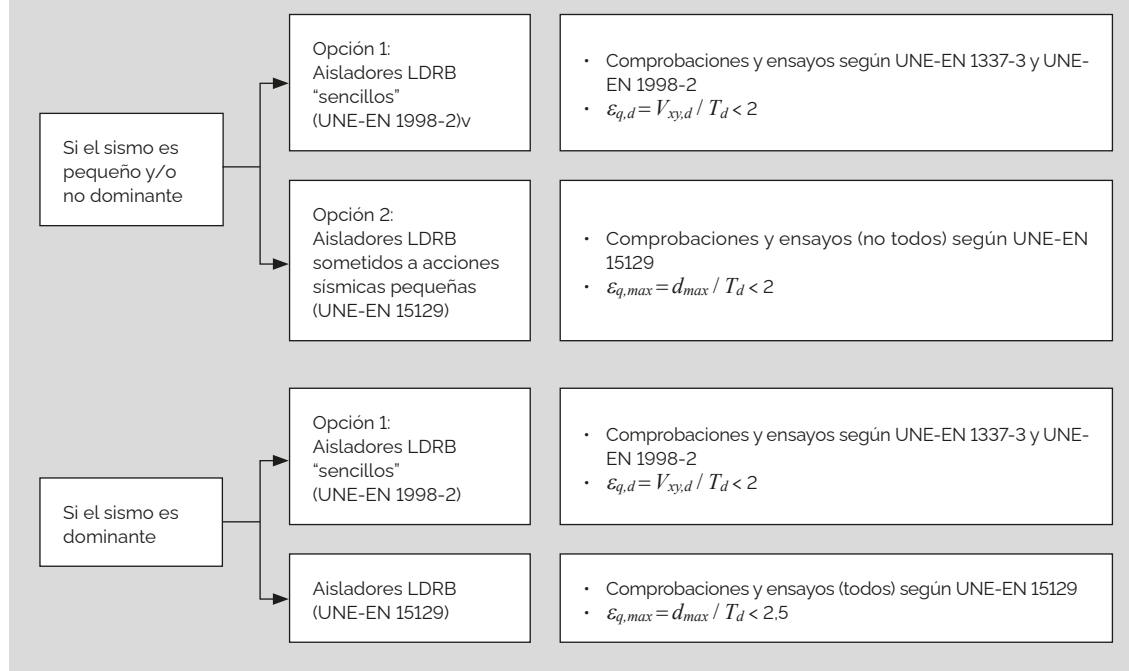
Comentario: aun cumpliéndose las dos condiciones anteriores ($d_{bd} < d_G$ y $V_{bd} < V_G$), el proyectista es libre para decidir si quiere considerar que el LDRB esté sometido a "acciones sísmicas pequeñas" o no. En el primer caso, no será necesario que el LDRB cumpla los requisitos que establece la norma UNE-EN 15129 (salvo el 8.2.1.2.11; los 8.2.1.2.2, 8.2.1.2.4, 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), pero a cambio tendrá que respetar, entre otras, la limitación $\varepsilon_{q,max} \leq 2$ del artículo 8.2.1.2.11 que se explica más adelante (ver apartado 7.3.2 de esta guía). En el segundo caso, podrá emplear el LDRB con $2 < \varepsilon_{q,max} \leq 2,5$ pero a cambio deberá cumplir UNE-EN 15129 en su totalidad. Los LDRB se pueden emplear cuando $d_{bd} \geq d_G$ y $V_{bd} \geq V_G$, pero en ese caso hay que cumplir UNE-EN 15129 en su totalidad.

Por último, el apartado 7 de UNE-EN 1998-2 define adicionalmente la posibilidad de utilizar apoyos elastoméricos "sencillos" de bajo amortiguamiento. Estos apoyos presentan las siguientes características y restricciones:

- Deben cumplir UNE-EN 1337-3 y no requieren las comprobaciones y ensayos de UNE-EN 15129, según los apartados 7.2 y 7.3(5)P, 7.5.2.1 y 7.5.2.3.3(5) de UNE-EN 1998-2.
- Se considera un amortiguamiento efectivo máximo del apoyo de $\xi_{eff,b} \leq 5\%$, según el apartado 7.5.2.4(5) de UNE-EN 1998-2.
- Las comprobaciones de deformaciones tangenciales y estabilidad de UNE-EN 1337-3 se deberán realizar también para la combinación sísmica (ver la *Guía para el cálculo de apoyos elastoméricos* [19]), según el apartado 7.6.2(5) de UNE-EN 1998-2.
- Se admite una deformación máxima debida al desplazamiento horizontal total máximo, $v_{xy,d}$, de hasta $\varepsilon_q \leq 2$ (considerando la suma vectorial de las dos direcciones para las combinaciones sísmicas: $\text{Sismo}_x + 0,30 \cdot \text{Sismo}_y$; $0,30 \cdot \text{Sismo}_x + \text{Sismo}_y$), según el apartado 7.6.2(6) de UNE-EN 1998-2. Se diferencia del d_{bd} en que este se calcula para cada dirección principal, mientras que $v_{xy,d}$ es total y obtenido como composición de las dos direcciones. Esto implica que en aisladores "sencillos" las comprobaciones se realizan con un desplazamiento mayor.

- Se puede utilizar una simplificación para analizar la variabilidad de propiedades del aislador, según el apartado 7.5.2.4(6) de UNE-EN 1998-2.

Comentario: EN 1998-2 se publicó con anterioridad a EN 15129. El Eurocódigo 8 de 2.^a generación prEN 1998 no incluye el concepto de apoyos elastoméricos "sencillos" de bajo amortiguamiento, y establece inequívocamente que la norma de aplicación es EN 15129. Esto significa que, con la entrada en vigor de los Eurocódigos de 2.^a generación, todos los aisladores elastoméricos en zonas con clase de sismicidad moderada o superior tendrán que cumplir íntegramente EN 15129. En el contexto en el momento de desarrollo de la presente guía, se puede hacer la siguiente clasificación en función de la relevancia de la acción sísmica:



Aisladores especiales de alto amortiguamiento: no se desarrollan en esta guía. Son aisladores con características especiales que permiten lograr altos niveles de amortiguamiento. De forma ilustrativa, se muestran a continuación los aisladores especiales contemplados en UNE-EN 15129 y en UNE-EN 1998-2:

- Aisladores elastoméricos de alto amortiguamiento (HDRB): similares en forma y constitución a los LDRB pero con un elastómero con elevada capacidad de disipación ($\xi_{eff,b} > 6\%$) que generalmente alcanza valores en torno al 15%. Presentan la ventaja, frente a otros aisladores elastoméricos de alta amortiguación (LDRB o PPRB) de tener una muy buena capacidad de recentrado.
- Aisladores elastoméricos con núcleo de plomo (LRB): aisladores tipo LDRB con un núcleo cilíndrico de plomo insertado en el centro del apoyo que permite que el aislador alcance niveles de amortiguamiento equivalente en torno al 20-40% por efecto de la plastificación del plomo.

- Aisladores elastoméricos con núcleo polimérico (PPRB): similares en forma a los aisladores LRB, salvo que el núcleo se constituye mediante un compuesto polimérico en vez de plomo.

4.2 Tipos de aisladores elastoméricos según el método de fijación

En el apartado 8.1 de UNE-EN 15129 se establece que todos los aisladores se deben sujetar a la estructura mediante fijaciones mecánicas con capacidad para asumir toda la carga horizontal o al menos el 75 % (siempre que se cumpla que la carga vertical se ha determinado mediante análisis dinámicos y que el 25 % de carga horizontal restante se pueda resistir mediante fricción, según se explica con mayor detalle en el apartado 7.3.7 de esta guía). En este sentido, deberá garantizarse una fijación horizontal del aislador directamente a la estructura o a unas placas de anclaje a la estructura.

Los aisladores elastoméricos no se clasifican según la tabla 2 de UNE-EN 1337-3 (A, B, C, D, E y F), si bien, en general, se asemejan al tipo C. Por ello, la UNE-EN 15129 establece que para los aisladores no es de aplicación la tabla 3 de UNE-EN 1337-3 sobre dimensiones normalizadas para apoyos tipo B. En cambio, la norma UNE-EN 15129 sí que establece en el apartado 8.2.3.2 dos tipos de fijación normalizados que se indican en la figura 5(a) y 5(b) (adaptación de la figura 3 de UNE-EN 15129). En ambos casos, existen dos placas de anclaje (sin rebajes) unidas a la estructura de tal forma que se impiden los movimientos relativos horizontales y verticales de las placas de anclaje respecto a la superestructura y a la subestructura. Así mismo, en ambos casos (a) y (b) el sistema de fijación permite que el aislador elastomérico pueda soportar fuerzas verticales de tracción. En la solución (a) (ver figura 5(a)) la placa de extremo y la placa de anclaje son el mismo elemento y debe estar adherido en caliente al material elastómero del aislador. En la solución (b) (ver figura 5b) las placas de extremo y las placas de anclaje son elementos distintos. En este caso las placas de extremo se fijan a las correspondientes placas de anclaje mediante un sistema de fijación que impide el movimiento relativo horizontal y vertical entre ambas placas.

La figura 5(c) (adaptación de la figura 3 de UNE-EN 15129) incluye un tercer método de fijación que la norma UNE-EN 15129 no considera como método de fijación normalizado o estándar. Consiste en insertar el aislador elastomérico en unos rebajes o huecos mecanizados que se practican en las placas de anclaje. Debe señalarse que con esta solución el aislador elastomérico no admite fuerzas verticales de tracción y debe verificarse su estabilidad de rodamiento tal y como se indica en 8.2.3.4.5 de UNE-EN 15129.

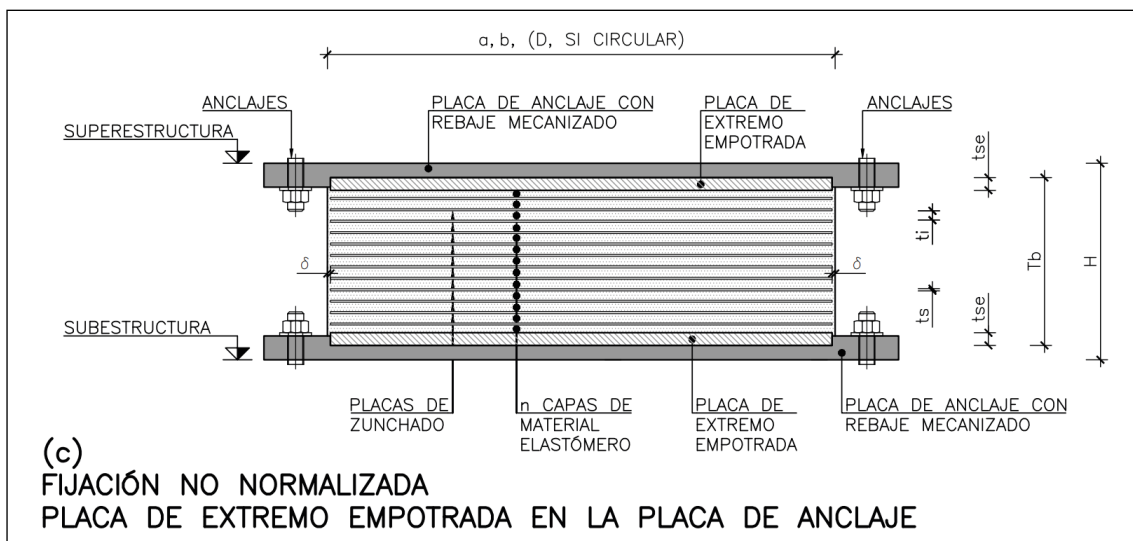
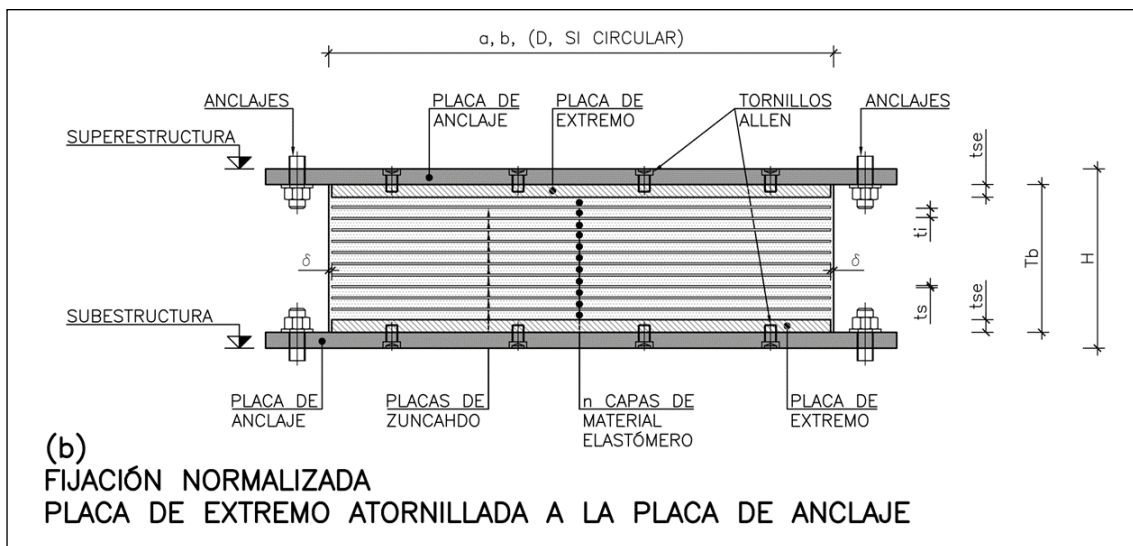
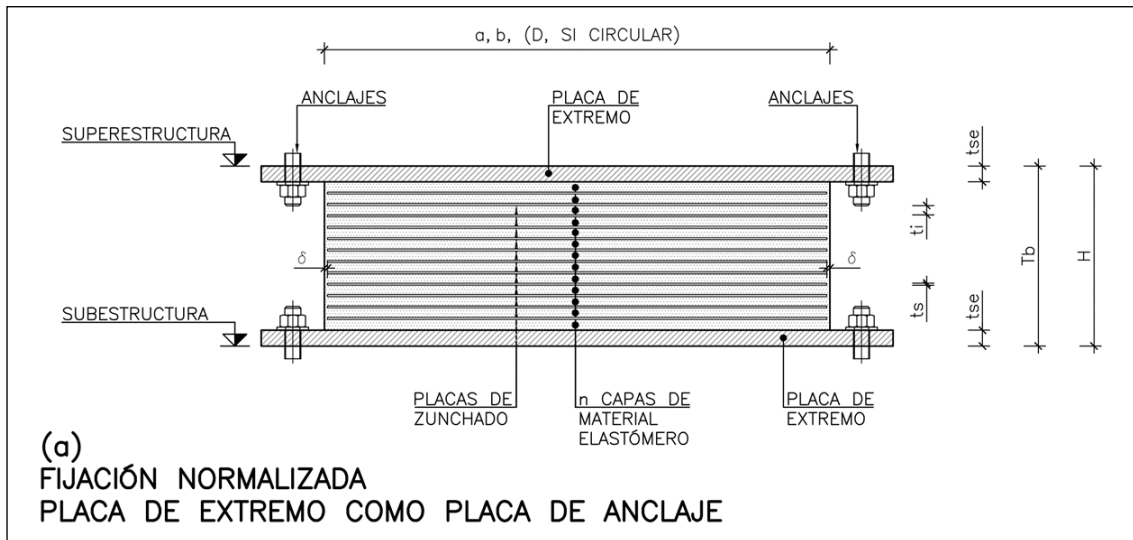


Figura 5 Métodos de fijación de aisladores elastoméricos según UNE-EN 15129

Comentario: los métodos de fijación normalizados de las figuras 5(b) y 5(a) coinciden con los denominados como tipo I y II en la norma ISO 22762 [8], respectivamente. Dicha norma incluye otras posibilidades de conexiones de aisladores elastoméricos no anclados verticalmente alternativos a la mostrada en la figura 5(c). Estas alternativas entrarían dentro de la consideración de no normalizadas según UNE-EN 15129. Se incluyen a continuación, por su posible interés para el proyecto, los métodos de fijación no normalizados denominados como tipo III en la norma ISO 22762 [8] (parte 3): aislador elastomérico empotrado en rebaje total de la placa de anclaje (placa de anclaje perimetral), según la figura 6(d); aislador elastomérico empotrado mediante pasadores, según la figura 6(e).

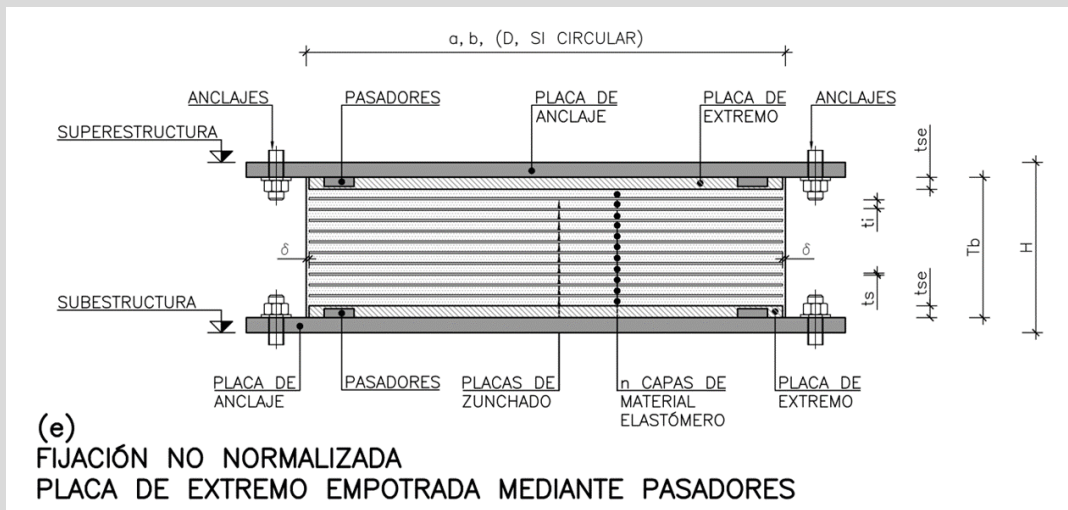
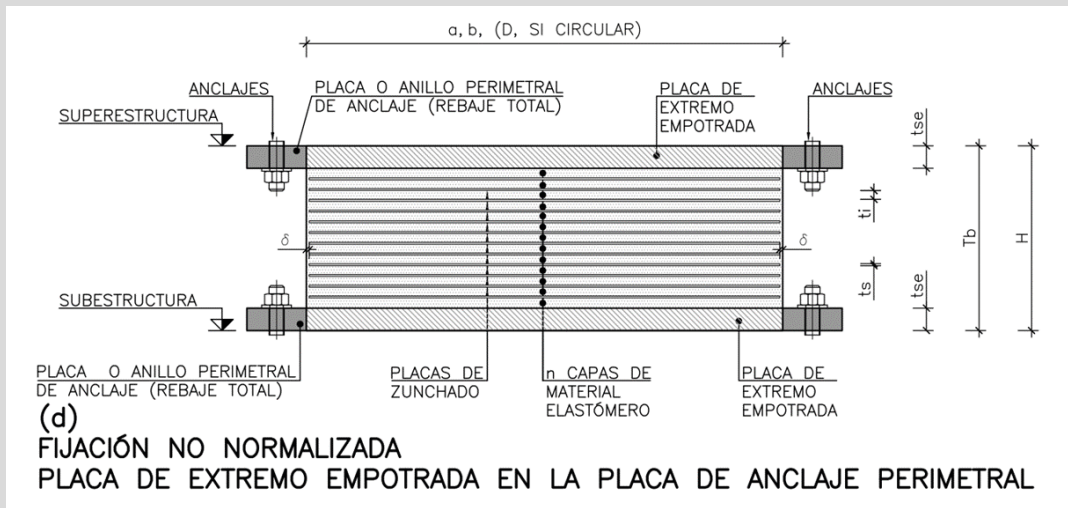


Figura 6 Métodos de fijación no normalizados de aisladores elastoméricos según ISO 22762

5

COMPONENTES DE LOS AISLADORES ELASTOMÉRICOS LDRB

Se describen a continuación las calidades, propiedades constitutivas y limitaciones normativas de los principales elementos que pueden incluirse en los aisladores elastoméricos de bajo amortiguamiento (LDRB), según la normativa: elastómero y placas de zunchado de acero.

5.1 Elastómeros

El elastómero es el material encargado de permitir movimientos y giros relativos entre la superestructura y la subestructura. Según el apartado 8.2.2.1.2.1 de UNE-EN 15129, los aisladores LDRB deben cumplir con las disposiciones del apartado 4.4.1 de UNE-EN 1337-3, que establecen que el componente de base debe estar constituido por uno de los siguientes materiales:

- Caucho natural (NR)
- Caucho de cloropreno (CR) o policloropreno, llamado comúnmente neopreno
- Caucho natural (NR) con recubrimiento exterior protector de cloropreno (CR), siempre y cuando se vulcanicen simultáneamente

Los elastómeros brutos utilizados deben ser de material virgen y, por tanto, no se debe admitir caucho vulcanizado recuperado o regenerado. Como adición al material de base, es admisible la incorporación de hasta un 5 % de otro polímero, que puede añadirse para ayudar al procesado.

Adicionalmente, los elastómeros deben cumplir los siguientes conjuntos de requerimientos:

- Requisitos de conformidad del material garantizados mediante ensayos, según se desarrollan en el apartado 8.3 de esta guía
- Limitaciones geométricas de proyecto (espesores de capas y de recubrimientos) según el apartado 7.3.4 de esta guía

5.2 Placas de zunchado de acero y placas de extremo

Las placas de zunchado y las placas de extremo que se utilizan en la fabricación de los aisladores elastoméricos deben satisfacer los requisitos indicados en el apartado 4.4.3 de la norma UNE-EN 1337-3. Se resume en:

- Acero S235 (EN 10025), u otro acero con un alargamiento a la rotura mínimo equivalente
- Espesores mínimos de placas, según el apartado 7.3.5 de esta guía

6

REQUISITOS DE PROYECTO DE AISLADORES ELASTOMÉRICOS LDRB

El apartado 4.2 de UNE-EN 15129 indica que todos los dispositivos antisísmicos y sus uniones a la estructura se deben diseñar y fabricar de forma que se cumplan una serie de requisitos generales imprescindibles:

- Requisitos estructurales y mecánicos
- Requisitos de fiabilidad aumentada
- Requisitos funcionales
- Requisitos de conformidad

Según el apartado 8.1 de UNE-EN 15129, los aisladores sísmicos deben ser apoyos estructurales de acuerdo con la norma UNE-EN 1337-1. Deben calcularse y fabricarse para soportar las cargas verticales permanentes de una estructura sin excesiva deformación por fluencia, y resistir las acciones no sísmicas tales como cargas debidas al viento y desplazamientos inducidos térmicamente. Estos aisladores elastoméricos deben proporcionar, mediante una baja rigidez a cortante, la baja frecuencia natural horizontal deseada para la estructura aislada.

Los aisladores deben proporcionar un nivel de amortiguación suficiente para controlar los desplazamientos horizontales producidos por las acciones sísmicas, salvo que se utilicen dispositivos suplementarios que proporcionen la amortiguación.

Comentario: en caso de que los desplazamientos resulten excesivos, se podrán controlar los desplazamientos con aisladores de mayor amortiguamiento (HDRB o LRB) u otros dispositivos suplementarios que lo proporcionen, si bien no forma parte del contenido de esta guía.

Los aisladores deben funcionar correctamente cuando se someten a las condiciones ambientales previstas durante su vida útil. Esta vida útil se basa en las declaraciones del fabricante y puede ser inferior a la vida útil de la infraestructura (apartado B.1 de UNE-EN 15129). Según los apartados 8.2.1.2.9 y 8.2.2.1.3.5 de UNE-EN 15129 los aisladores elastoméricos suelen prever una vida útil de 60 años, si bien el proyecto puede requerir específicamente otros plazos.

Cuando los aisladores puedan estar sometidos a condiciones ambientales y de aplicación excepcionales, tales como inmersión en agua, expuestos a aceites, a productos químicos, o a radiación, o instalados en una zona donde exista un riesgo de incendio importante, se deben tomar precauciones adicionales (véase la norma UNE-EN 1337-9) en base a una definición precisa de las condiciones.

Los aisladores que se consideran en UNE-EN 15129 proporcionan aislamiento únicamente contra acciones sísmicas horizontales. Según se indica en el apartado 8.1 de UNE-EN 15129, estos aisladores se pueden diseñar adicionalmente para que proporcionen aislamiento contra vibraciones verticales no sísmicas, siempre y cuando se realicen ensayos de rigidez vertical adicionales a los indicados en el apartado 8.2.1.2.8 de UNE-EN 15129.

6.1 Requisitos estructurales y mecánicos

Los apartados 4.2.1, 4.2.4 y 8.2.1.3 de UNE-EN 15129 establecen la necesidad de cumplimiento de los siguientes criterios:

6.1.1 Requisitos en el Estado Límite Último (ELU)

Los aisladores elastoméricos y sus uniones se deben diseñar y fabricar para resistir las acciones sísmicas definidas en UNE-EN 1998 sin que se produzca su rotura local y global y manteniendo una cierta capacidad mecánica remanente una vez transcurrido el episodio sísmico. Las verificaciones están asociadas a la combinación sísmica de ELU, teniendo en cuenta el coeficiente de mayoración por fiabilidad aumentada, γ_x , definido en los apartados 4.2.2 de UNE-EN 15129 (apartado 6.2 de esta guía), 10.3 de UNE-EN 1998-1 y 7.6.2 de UNE-EN 1998-2 (en donde se denomina γ_{IS} , ver tabla 1). El sismo de cálculo utilizado en la combinación sísmica se debe obtener a partir del Anejo Nacional de UNE-EN 1998 y se corresponde con un periodo de retorno de 475 años en puentes de importancia II ($\gamma_I = 1$), según el apartado 2.1 de UNE-EN 1998-1.

Los requisitos en ELU se satisfacen (apartado 8.2.1.3.1 de UNE-EN 15129) cuando se cumple:

- Comprobación de la deformación tangencial total máxima de cálculo del apartado 8.2.3.4.2 de UNE-EN 15129 (ver apartado 7.3.2 de esta guía).
- Comprobaciones de estabilidad:
 - Si con el sistema empleado para fijar el aislador elastomérico a la superestructura y a la subestructura el aislador puede soportar tracciones de eje vertical, debe comprobarse su estabilidad al pandeo de flexión lateral según el apartado 8.2.3.4.4

de UNE-EN 15129 (apartado 7.3.6.1 de esta guía). Es el caso de los aisladores con fijaciones normalizadas (a) y (b) de la figura 5.

- Si con el sistema empleado para fijar el aislador elastomérico a la superestructura y a la subestructura el aislador no puede soportar tracciones de eje vertical, debe comprobarse su estabilidad de rodamiento según el apartado de 8.2.3.4.5 de UNE-EN 15129 (apartado 7.3.6.2 de esta guía). Es el caso de aisladores encajados en rebajes de las placas de anclaje (figuras 5(c) y 6(a)) o mediante dispositivos que impiden el desplazamiento horizontal relativo entre aislador y la estructura, pero permiten el desplazamiento vertical relativo entre ambos (figura 6(b)).
- Comprobación de capacidad de desplazamiento horizontal:
 - En aisladores LDRB sometidos a una acción sísmica del terremoto de proyecto que no se considere pequeña, la comprobación mediante ensayo se realiza según el apartado 8.2.1.2.7 de UNE-EN 15129 (ver apartado 8.2.1.2.1 de esta guía).
 - En aisladores LDRB sometidos a una acción sísmica del terremoto de proyecto que se considere pequeña (y cumplan por lo tanto los dos requisitos que se definen en apartado 4.1 de esta guía), la comprobación mediante ensayo se realiza según el apartado 8.2.1.2.7 modificado según se indica en el apartado 8.2.1.2.11 de UNE-EN 15129 (ver apartado 4.1 de esta guía).

6.1.2 Requisitos en el Estado Límite de Servicio

Los aisladores elastoméricos y sus uniones se deben diseñar y fabricar para resistir con daños limitados una acción sísmica de menor periodo de retorno que la acción sísmica de cálculo, es decir, la asociada al ELU. Frente a este sismo, los aisladores no deben sufrir daños, o estos serán suficientemente pequeños como para poder asumir futuras sollicitaciones sísmicas de cálculo y por tanto no se requiere su sustitución.

El nivel de la acción sísmica utilizado en la combinación sísmica para verificar el ELS se puede encontrar en el Anejo Nacional de UNE-EN 1998-1 y se corresponde con un periodo de retorno de 95 años, según el apartado 2.1 de UNE-EN 1998-1.

En cualquier caso, el apartado 8.2.1.3.2 de UNE-EN 15129 establece que el cumplimiento de los requisitos de ELU establecidos en el apartado 8.2.1.3.1 de UNE-EN 15129 (apartado 6.1.1 de esta guía) aseguran la capacidad de servicio y, por tanto, el requisito de limitación de daño en ELS queda automáticamente garantizado.

6.2 Requisitos de fiabilidad aumentada

Los apartados 4.2.2 y 8.1 de UNE-EN 15129, 10.3 de UNE-EN 1998-1 y 7.6.2 de UNE-EN 1998-2 establecen que, para garantizar una fiabilidad aumentada del sistema, los aisladores deben comprobarse frente al desplazamiento máximo de un aislador, d_{max} . Dicho desplazamiento de cálculo mayorado se obtiene mediante la aplicación del coeficiente de mayoración por fiabilidad aumentada, γ_x , sobre el desplazamiento sísmico de cálculo, d_{bd} y añadiendo el

desplazamiento, d_G , inducido potencialmente por las acciones permanentes, las deformaciones a largo plazo de la superestructura y el 50 % de la acción térmica (ver apartado 7.3.1 de esta guía para mayor definición).

$$d_{max} = \gamma_x d_{bd} + d_G \quad (3)$$

donde:

d_{max} es el desplazamiento máximo de cada aislador (igual a d_{Ed} en UNE-EN 15129 si se particulariza para puentes; $d_{m,i}$ en UNE-EN 1998-2)

d_{bd} es el desplazamiento sísmico de cálculo de cada aislador ($d_{bi,d}$ en UNE-EN 1998-2)

γ_x coeficiente de mayoración por fiabilidad aumentada (γ_{IS} en UNE-EN 1998-2)

El valor del coeficiente de mayoración por fiabilidad aumentada a considerar en aisladores para puentes es de $\gamma_x = 1,50$, según el apartado 7.6.2 de UNE-EN 1998-2 y el Anejo Nacional.

Comentario: d_{Ed} es el desplazamiento máximo de un aislador en cualquier tipo de estructura. En puentes, el valor de cálculo de desplazamiento mayorado d_{Ed} es igual al desplazamiento máximo de un aislador $d_{Ed} = d_{max} = d_G + \gamma_x \cdot d_{bd}$. En edificaciones, por ejemplo, d_{Ed} es directamente $d_{Ed} = \gamma_x \cdot d_{bd}$ ya que, si los aisladores están en la cimentación, no hay deformaciones horizontales por cargas permanentes ni por térmico ($d_G = 0$). La norma UNE-EN 15129 utiliza ambas nomenclaturas para referirse al mismo desplazamiento aplicado a puentes. En esta guía se priorizará el uso de d_{max} (ver tabla 1 de esta guía).

6.3 Requisitos funcionales

Según el apartado 8.2.1.1 de UNE-EN 15129, los aisladores elastoméricos deben ser conformes con los requisitos generales y funcionales dados en los apartados 4.1 y 4.2 de UNE-EN 1337-3, que pueden encontrarse resumidos en la *Guía para el cálculo de apoyos elastoméricos* [19].

De forma particular, el apartado 4.2.3 de UNE-EN 15129 indica que los aisladores sísmicos y sus uniones se deben diseñar y fabricar de manera que los requisitos estructurales y de fiabilidad se mantengan durante toda la vida útil del proyecto, bajo las condiciones mecánicas, físicas, químicas, biológicas y ambientales previstas.

Además, los aisladores sísmicos deben ser inspeccionables y sustituibles, para lo cual se exigen los siguientes requerimientos contemplados en los apartados 4.4.3 y 4.4.4 de UNE-EN 15129, 10.5.1 de UNE-EN 1998-1 y 7.7.3 de UNE-EN 1998-2:

- El proyecto de la estructura debe tener en cuenta la accesibilidad de personal y equipo para inspección, mantenimiento y sustitución.

- Protección, en caso de ser necesario, frente a fuego, ataque químico/biológico.
- Elaboración de un programa de inspección y mantenimiento para el aislador.
- La reparación o sustitución de un aislador o componente del mismo debe realizarse bajo la dirección de la entidad responsable del mantenimiento del puente, y debe recogerse en un informe adecuado. Los nuevos dispositivos deberán cumplir con los requisitos de UNE-EN 15129, así como con aquellos adicionales definidos originalmente por el propietario de la infraestructura.

El apartado B.5 del anexo B de UNE-EN 15129 indica que para la sustitución de los aisladores son admisibles pequeñas demoliciones localizadas en el entorno del anclaje.

6.4 Requisitos de conformidad

Se debe garantizar la conformidad de los procedimientos y producto final de los aisladores elastoméricos, a lo largo de su proceso de fabricación, con las exigencias de UNE-EN 15129. El cumplimiento de estos requisitos de conformidad se demuestra mediante la realización de ensayos de tipo (*Type Tests* o *TT*) y de ensayos de control de producción en fábrica (*Factory Production Control Tests* o *FPCT*), y la certificación de cumplimiento con las exigencias de la norma se materializa mediante la emisión del marcado CE en el producto terminado.

Los requisitos de conformidad se desarrollan en detalle en el apartado 8 de esta guía.

7

CÁLCULO ESTRUCTURAL DE AISLADORES ELASTOMÉRICOS LDRB

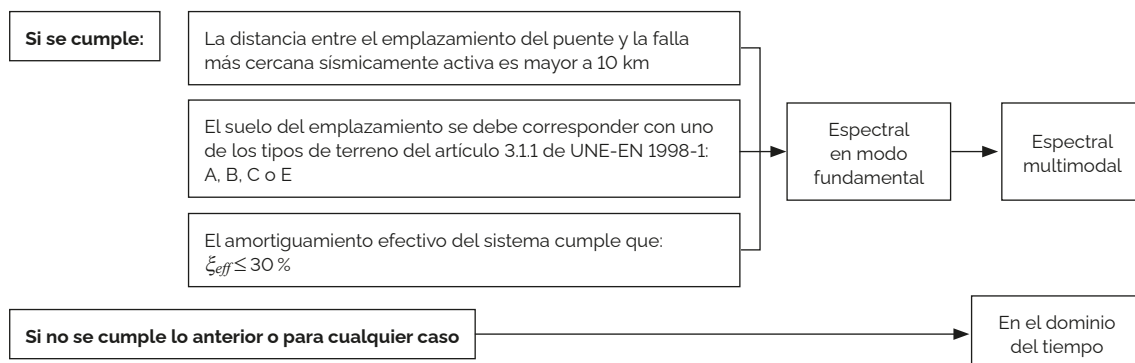
La metodología, requisitos de proyecto y reglas específicas de cálculo de aisladores deben ser totalmente compatibles con lo indicado en UNE-EN 1998, siendo de obligado cumplimiento los criterios de conformidad del apartado 2.2 de UNE-EN 1998-1. La norma UNE-EN 15129 cubre requisitos adicionales y reglas específicas de proyecto que complementan a los Eurocódigos (anexo B de UNE-EN 15129).

7.1 Metodología de análisis

El apartado 7.5 de UNE-EN 1998-2 establece las distintas metodologías de cálculo aplicables al aislamiento sísmico en puentes:

- Análisis espectral basado en el modo fundamental
- Análisis espectral multimodal
- Análisis en el dominio del tiempo (lineal en aisladores LDRB)

Las diferentes metodologías podrán aplicarse en función del cumplimiento de los siguientes criterios reflejados en los apartados 7.5.3 y 7.5.4 de UNE-EN 1998-2:



En aisladores elastoméricos de bajo amortiguamiento (LDRB), el apartado 7.5.1(3) de UNE-EN 1998-2 establece que podrá realizarse el análisis sísmico mediante cálculo dinámico lineal utilizando el método de los espectros de respuesta del apartado 4.2 de dicha norma (ver apartado 7.2.4.2 de esta guía). En la aplicación de este método, será suficiente considerar solo el modo fundamental, siempre que se cumplan los criterios de modelo de tablero rígido del apartado 4.2.2 de UNE-EN 1998-2; de lo contrario habrá que combinar la respuesta obtenida para más de un modo de vibración (multimodal). 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. El resultado de este modelo proporciona el desplazamiento en el centro de rigidez del sistema de aislamiento con respecto al suelo, d_{cd} , a partir del cual se pueden obtener los desplazamientos de cálculo de los aisladores, d_{bd} , teniendo en cuenta el reparto de rigideces entre los elementos de subestructura. El apartado 7.5.4 de UNE-EN 1998-2 proporciona expresiones para calcular d_{cd} en función de una representación adimensional del espectro de respuesta, que se muestra representada en la figura 7.

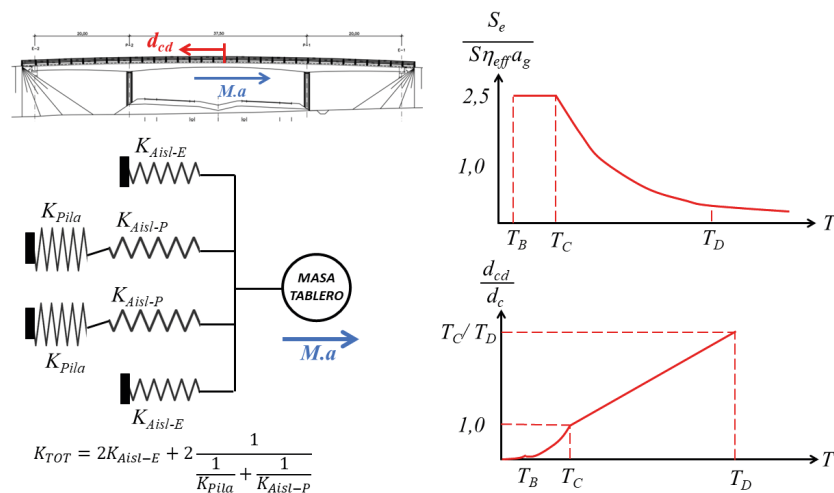


Figura 7 Representación esquemática del modo fundamental y espectros adimensionales de cálculo de aceleraciones y de desplazamientos basados en la figura 7.4 de UNE-EN 1998-2

Según el apartado 7.4.1(1)P de UNE-EN 1998-2, el espectro de cálculo utilizado no debe ser inferior al espectro elástico de respuesta definido en el apartado 3.2.2.2 de UNE-EN 1998-1, que depende del coeficiente corrector de amortiguamiento, $\eta(\xi_{eff}) = \eta_{eff}$. El coeficiente corrector por amortiguamiento η a emplear será el correspondiente a la fracción de amortiguamiento efectivo ξ_{eff} del sistema con aislamiento de base.

En los casos en los que se aplique el método espectral multimodal, el apartado 7.5.5(4) de UNE-EN 1998-2 establece que la fracción de amortiguamiento efectivo ξ_{eff} a emplear en el cálculo del coeficiente corrector por amortiguamiento η será distinta según el modo de vibración analizado. Se asume que en los modos de vibración con periodos entre $0,8 T_{eff}$ y T_{eff} se moviliza el sistema de aislamiento (deforman los aisladores) y por lo tanto se debe emplear ξ_{eff} . Cuando se emplean LDRB, en estos modos el apartado 7.5.2.4 de UNE-EN 1998-2 permite adoptar $\xi_{eff} = 0,05$ (ver ejemplo de espectro de cálculo multimodal en la figura 2). Además, los apartados 7.5.5(6),(7) y (8) de UNE-EN 1998-2 establecen unos valores mínimos a la respuesta obtenida por el método espectral multimodal. Concretamente, establece en cada dirección un

mínimo de desplazamiento en el centro de rigidez del sistema de aislamiento, d_{cd} , y un cortante total mínimo, V_d , que debe poder transmitir el sistema de aislamiento. Exige que estos no sean inferiores al 80 % del desplazamiento en el centro de rigidez del sistema de aislamiento y del cortante transmitido en el sistema de aislamiento que se obtiene considerando sólo el primer modo de vibración en cada dirección ($d_{cd,min} = 0,8 d_{cf}$ y $V_{d,min} = 0,8 V_f$; siendo d_{cf} y V_f el desplazamiento y cortante obtenidos mediante la aplicación del método del modo fundamental). Cuando el puente es "razonablemente" asimilable a un sistema de un grado de libertad (es decir, la respuesta está controlada por el primero modo de vibración) se permite que d_{cf} y V_f se calculen con el método del modo fundamental. Cuando no es así (por ejemplo, puentes con pilas muy altas cuya masa influye significativamente en el desplazamiento del tablero o puentes con fuertes excentricidades), d_{cf} y V_f se calculan con la respuesta obtenida en el primer modo de vibración aplicando el método espectral multimodal. Se recuerda también que en el análisis multimodal se debe utilizar un número de modos tal que se garantice la movilización de un 90 % de la masa en cada dirección, según el apartado 4.3.3.2.1(3) de UNE-EN 1998-1.

Comentario: en estructuras analizadas mediante el método espectral multimodal, la consideración de $\xi_{eff} = 0,05$ (5 %) es sólo aplicable para los periodos entre $0,8 T_{eff}$ y T_{eff} . Para el resto de los modos, se considerará el amortiguamiento inherente de la estructura, ξ (ξ_i en la nomenclatura de la 2.ª generación de los Eurocódigos). A este respecto, UNE-EN 1998-2 indica en su apartado 4.1.3 los valores que se podrán adoptar en función de los materiales de los elementos en donde se disipa la mayor parte de energía mediante el amortiguamiento inherente (2 % en acero soldado, 4 % en acero con conexiones atornilladas, 5 % en hormigón armado y 2 % en hormigón pretensado), y cómo se combinan en caso de existir varios de estos materiales juntos. En una interpretación rigurosa, el amortiguamiento inherente a considerar generalmente será menor a los valores considerados en el apartado 4.1.3 de UNE-EN 1998-2, que tienen en cuenta fisuraciones y ciertas plastificaciones, ya que el uso de sistemas de aislamiento exige que la subestructura permanezca esencialmente elástica (sin formación de plastificaciones). En UNE-EN 1998-2 no se proporcionan valores adicionales a los de su apartado 4.1.3. En el caso de puentes, estos elementos generalmente serán las pilas. Considerar un amortiguamiento inferior al 5 % en pilas de hormigón armado para mantener las pilas elásticas y con el daño controlado puede ser una práctica adecuada. Tanto si se hiciera esta última consideración como si los materiales fueran distintos de hormigón armado, se deberá hacer una corrección del espectro elástico de respuesta mediante coeficiente corrector por amortiguamiento, η , para los periodos por debajo de $0,8 T_{eff}$, obteniendo un espectro de cálculo similar al mostrado en la figura 2 de esta guía.

El análisis en el dominio del tiempo también podrá utilizarse, según el criterio del proyectista, mediante la utilización de registros característicos de la zona, según los requerimientos de UNE-EN 1998. La aplicación de esta metodología requiere de un gran conocimiento y experiencia, ya que la selección de los acelerogramas es crucial y muchas veces falta información que permita seleccionar terremotos que reproduzcan de forma realista la sismicidad del lugar.

Los resultados de los análisis sísmicos en cada dirección (componentes longitudinal, transversal y vertical) deberán combinarse entre sí según se indica en los apartados 4.3.3.5.1 y 4.3.3.5.2 de UNE-EN 1998-1. Además, según se indica en el apartado 4.3.3.5.2 de UNE-EN 1998-1, en puentes con sistemas de aislamiento, el efecto de la componente vertical del sismo debe analizarse siempre que la aceleración vertical cumpla que $a_{vg} > 0,25 g$.

Es importante recordar que para puentes aislados sísmicamente la respuesta de la subestructura y superestructura debe suponerse como de ductilidad limitada ($q \leq 1,5$), según los apartados 7.3(2)P y 7.6.3(2) de UNE-EN 1998-2. Así mismo, el apartado 5.8.2(2)P indica que las cimentaciones deberán permanecer elásticas, es decir, manteniendo $q = 1,0$. El factor de comportamiento en el caso de considerar ductilidad limitada ($q \leq 1,5$), se aplicará para reducir directamente los esfuerzos sísmicos de dimensionamiento resultantes del análisis con el espectro elástico de respuesta del apartado 3.2.2.2 de UNE-EN 1998-1, según se indica en el apartado 7.6.3(2) de UNE-EN 1998-2.

Para el análisis sísmico con ductilidad limitada, el apartado 2.3.6.1(3) de UNE-EN 1998-2 indica que la rigidez a considerar en las pilas, en caso de ser de hormigón, puede ser, o bien la rigidez efectiva que tiene en cuenta la fisuración frente a las sollicitaciones, o bien directamente la rigidez debida a la inercia bruta.

7.2 Propiedades de cálculo

Se desarrollan a continuación los conceptos básicos de cálculo que permiten estimar las propiedades de los aisladores elastoméricos de cara al análisis estructural:

- Parámetros geométricos: áreas en planta (A, A', A_l, A_r) y factor de forma S
- Propiedades nominales de los materiales: módulo de elasticidad transversal (G) y módulos de compresión o elasticidad longitudinal ($E_c, E_{l,c}, E_b$)
- Propiedades nominales de los aisladores: rigideces elásticas (K_b, K_v, K_θ), rigidez efectiva ($K_{eff,b}$) y amortiguamiento efectivo ($\xi_{eff,b}$)
- Variabilidad de las propiedades de los aisladores: límite superior (UBDP) y límite inferior (LBDP) de las propiedades mecánicas

7.2.1 Parámetros geométricos

7.2.1.1 Área total, A , área efectiva, A' y A_l , y área efectiva reducida, A_r , del apoyo

Los parámetros A, A', A_l 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* [19].

El área total en planta del elastómero, A , es el área en planta ocupada por el elastómero. Se utiliza en el cálculo de las rigideces aportadas 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. El apartado 5.3.3.2 de UNE-EN 1337-3 define A_r en apoyos elastoméricos como el valor dado por la expresión (4), que tiene en cuenta los desplazamientos máximos debidos a todos los efectos de la carga de cálculo. Los apartados 8.2.3.1 y 8.2.3.3.2 de UNE-EN 15129 matizan que, para el cálculo de A_r en aisladores sísmicos elastoméricos, deben tenerse en cuenta únicamente los desplazamientos horizontales debidos a las acciones de cálculo no sísmicas de la combinación sísmica de ELU (tanto deformaciones impuestas como fuerzas horizontales).

$$A_r = A_I \left(1 - \frac{v_{G,x}}{a'} - \frac{v_{G,y}}{b'} \right) \quad (4)$$

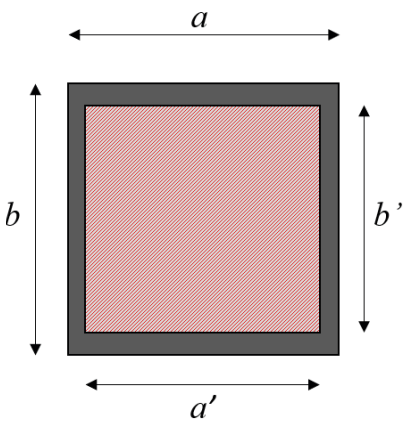
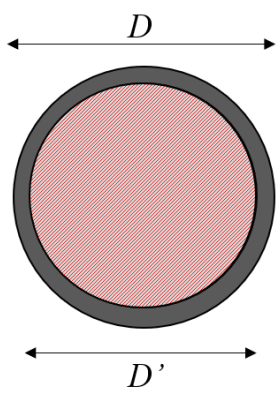
donde:

- A_I es el área en planta efectiva del aislador elastomérico descontando agujeros, en m^2
- a' y b' dimensiones efectivas del aislador elastomérico (dimensiones de las placas de zunchado) donde a' es la medida en la dirección de menor dimensión, en m
- $v_{G,x}$ es el desplazamiento máximo horizontal relativo entre las placas de extremo del aislador elastomérico debido a las acciones no sísmicas de la combinación sísmica de ELU (incluyendo tanto deformaciones impuestas como fuerzas instantáneas), medido en la dirección de la dimensión a . En general, esta dirección coincide con la dirección longitudinal del puente, en m
- $v_{G,y}$ es el desplazamiento máximo horizontal relativo entre las placas de extremo del aislador elastomérico debido a las acciones no sísmicas de la combinación sísmica de ELU (incluyendo tanto deformaciones impuestas como fuerzas instantáneas), medido en la dirección de la dimensión b . En general, esta dirección coincide con la dirección transversal del puente, en m

Comentario: del contenido y la filosofía de UNE-EN 15129 se asume que A_r se obtiene para las acciones no sísmicas con sus correspondientes valores de límite superior e inferior de las propiedades (sin considerar el cortante dinámico, α , para acciones sísmicas).

Las normas UNE-EN 1337 y UNE-EN 15129 no establecen criterios particulares para la obtención del área reducida A_r , según la forma del aislador. La tabla 3 muestra la aplicación de la formulación del apartado 5.3.3.2 de UNE-EN 1337-3 a los aisladores elastoméricos circulares.

Tabla 3 Valores de los parámetros geométricos para aisladores rectangulares y circulares

Aislador rectangular	Aislador circular
 <p> $A = ab$ $A_1 = a'b'$ $A_r = A_1 - b'v_{Gx} - a'v_{Gy}$ $S = \frac{A_1}{2(a' + b')t_r}$ </p>	 <p> $A = \pi D^2 / 4$ $A_1 = \pi D'^2 / 4$ $A_r = A_1 - D'v_{Gx} - D'v_{Gy}$ $S = \frac{D'}{4t_r}$ </p>

En la versión más avanzada, a fecha de redacción de esta guía, del borrador (año 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 (5). Se ha comprobado que la diferencia entre la aplicación de la expresión vigente (4) y la de la pre-norma es reducida.

$$A_{r,circ} = \frac{1}{2} \left[\frac{4 \cdot A'}{\pi} \cdot \arcsen \left(\frac{\sqrt{D'^2 - v_{G,xy}^2}}{D'} \right) - \left(v_{G,xy} \sqrt{D'^2 - v_{G,xy}^2} \right) \right] \quad (5)$$

donde:

$v_{G,xy}$ es el desplazamiento máximo horizontal relativo de las partes del apoyo obtenido por la suma vectorial de $v_{G,x}$ y $v_{G,y}$.

7.2.2 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. Por tanto, el factor de forma viene dado por:

$$S = \frac{A_I}{l_p \cdot t_r} \text{ para una capa de elastómero individual} \quad (6)$$

donde:

A_I es el área efectiva del aislador según el apartado 5.3.3.1 de UNE-EN 1337-3 (ver el apartado 7.2.1.1 de esta guía), en m^2

l_p es el perímetro libre de fuerza del aislador elastomérico, en m. En los casos de aislador rectangular y circular sin agujeros resulta:

$$\text{Rectangular: } l_p = 2(a' + b') \quad (7)$$

$$\text{Circular: } l_p = \pi \cdot D' \quad (8)$$

t_r es el espesor efectivo de una capa de material elastómero que, en los aisladores elastoméricos, debe ser tomado igual al espesor de las capas internas, t_i en m

En la tabla 3 se muestran las expresiones de obtención del factor de forma S particularizadas para los casos de aisladores rectangulares y circulares.

7.2.3 Propiedades nominales de los materiales

Las propiedades nominales o propiedades medias (DP) son las que se utilizan para el cálculo de los aisladores elastoméricos partiendo de valores de referencia normativos, de fabricantes o basados en las prácticas habituales. Según se indica en los apartados 4.5.2 de UNE-EN 15129 y 7.5.2.4 de UNE-EN 1998-2, estos valores adoptados deben ser validados mediante ensayos de tipo.

Comentario: el apartado 4.5.2 de UNE-EN 15129 indica que las propiedades de cálculo (DP) se deben obtener de los ensayos tipo. Estos ensayos buscan garantizar el cumplimiento de los requisitos de funcionamiento de los aisladores elastoméricos, y permiten establecer de forma certera las propiedades a emplear en el cálculo. A efectos prácticos, se recomienda que estas propiedades obtenidas de los ensayos validen las propiedades adoptadas en el cálculo estructural, según la indicación del apartado 7.5.2.4 de UNE-EN 1998-2.

7.2.3.1 Módulo de elasticidad transversal, G

El módulo de elasticidad transversal o de cizallamiento de un elastómero depende de diversos factores como la temperatura de operación, la edad y calidad de la goma o la velocidad de aplicación de la carga. Según los apartados 4.3.1.1 y 4.4.2 de UNE-EN 1337-3, para una temperatura nominal de 23 °C +/- 2 °C, el valor del módulo de elasticidad transversal convencional aparente (no dinámico) obtenido en los ensayos, G_g , debe valer 0,9 MPa, si bien, por requerimientos de proyecto pueden solicitarse valores de 0,7 o 1,15 MPa.

Adicionalmente, en su apartado 5.3.3, UNE-EN 1337-3 indica que el módulo de elasticidad transversal nominal, G (valor a emplear en las comprobaciones recogidas en dicha norma), puede modificarse por los efectos de carga dinámicos (estructuras de ferrocarriles, sismo) [17], dependiendo de las frecuencias de excitación (generalmente frecuencias > 6Hz) y de la amplitud del movimiento. Es decir, frente a acciones lentas $G = G_g$, y frente a acciones muy rápidas (no sísmicas) un valor superior, que puede adoptarse, según se indica en el apartado 8.2.1.2.2 de UNE-EN 15129, como el correspondiente a la rigidez de un aislador elastomérico cuando se alcanza una deformación tangencial del 5 % en ensayo cíclico según el apartado 8.2.3.3.1 de dicha norma (ver apartado 8.2.1.2.1 de esta guía).

Comentario: en fase de proyecto, en ausencia de valores del fabricante o de ensayos, es práctica habitual [5] considerar un valor de $G \approx 2 \cdot G_g$ para las acciones rápidas no sísmicas (frenado, fuerza centrífuga, viento, etc.).

La norma UNE-EN 15129, al referirse a G se refiere al módulo de elasticidad transversal dinámico para las frecuencias de la excitación sísmica (en adelante en esta guía, G seguirá esta definición según UNE-EN 15129). En este sentido, el apartado 8.2.3.3.1 de UNE-EN 15129 indica que el valor exacto de G (módulo de elasticidad transversal dinámico) para el cálculo, debe ser determinado mediante un ensayo cíclico del elastómero vulcanizado según el apartado 8.2.2.1.3.2. para una deformación de cortante del 100 % a 23 °C y una frecuencia recomendada de 0,5 Hz (u otra frecuencia según especificación del proyectista). También se establece la necesidad de validar mediante ensayos del material elastómero el valor de G dinámico, según se indica en su apartado 8.2.4.2.5.2 y en el apartado 8.3 de esta guía sobre los requerimientos de aptitud de materiales. El apartado 8.2.2.1.1 de UNE-EN 15129 permite un rango de G dinámico por sismo entre 0,3 MPa a 1,5 MPa. Este rango más amplio que el de UNE-EN 1337-3 aporta versatilidad a la hora de aumentar o disminuir la rigidez sin necesidad de alterar la geometría en planta y alzado.

En ausencia de información en proyecto del valor nominal de G , según UNE-EN 15129, el apartado 7.5.2.4(5) de UNE-EN 1998-2 propone una estimación del mismo mediante la aplicación sobre G_g de un coeficiente de cortante dinámico, α :

$$G = \alpha G_g \quad (9)$$

donde:

- α es el coeficiente de cortante dinámico, que normalmente está comprendido entre 1,10 y 1,40, según UNE-EN 1998-2
- G_g es el módulo de elasticidad transversal convencional aparente obtenido mediante ensayos, que puede adoptar un valor de 0,9 MPa

En caso de seguirse este procedimiento, las estimaciones realizadas mediante la aplicación del coeficiente de cortante dinámico deberán contrastarse con los valores de G obtenidos mediante ensayo cíclico según el apartado 8.2.2.1.3.2 de UNE-EN 15129, corrigiendo el análisis si fuera necesario, o estar cubiertas por un análisis de variabilidad de propiedades que tenga en cuenta la pérdida de rigidización por cargas rápidas (ver apartado 7.2.5.1 de esta guía).

Comentario: en proyecto, en ausencia de información sobre el valor de G_g o de G , se proponen dos posibles vías de actuación:

Opción 1: adoptar un valor de $G_g = 0,7-1,15$ MPa. Para estimar en proyecto el valor de G para el cálculo según UNE-EN 15129, se podría utilizar la siguiente gama de coeficiente de cortante dinámico con aplicación a los valores límite de las propiedades (ver apartado 7.2.5 de esta guía).

- Valores nominales (DP): $G = \alpha \cdot G_g$, con $\alpha = 1,25$ (valor medio entre 1,1 y 1,4)
- Valores de límite superior (UBDP): $G = \lambda_{fi,UBDP} \cdot \alpha \cdot G_g$, con $\alpha = 1,4$
- Valores de límite inferior (LBDP): $G = \lambda_{fi,LBDP} \cdot \alpha \cdot G_g$, con $\alpha = 1,0$ (se recomienda $\alpha = 1,0$ en vez de 1,1, 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).

Opción 2: 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. Para estimar en proyecto el valor de G_g para las comprobaciones según UNE-EN 1337-3 (que en general no serán condicionantes), se podría utilizar 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 segundo enfoque es más práctico que el primero, ya que se reduce la variabilidad a considerar en el análisis sísmico puesto que el rango de α de 1,1 a 1,4 ya no se incluiría en la determinación de las propiedades UBDP y LBDP.

7.2.3.2 Módulo de compresión, E_c

El módulo de compresión E_c de una capa de material elastómero, según se define en el apartado F.3.3.1 del anexo F de UNE-EN 15129, se obtiene como combinación en serie de dos términos de rigidez: el módulo de compresión suponiendo que el material es incompresible cuando se somete a presión uniforme en toda su superficie, $E_{l,c}$, y el módulo de compresibilidad volumétrica del elastómero, E_b :

$$\frac{1}{E_c} = \frac{1}{E_{l,c}} + \frac{1}{E_b} \quad (10)$$

El módulo de compresión suponiendo que el material es incompresible, $E_{l,c}$, depende del valor nominal del módulo de elasticidad transversal, G , y del factor de forma del aislador, S . La norma UNE-EN 15129 establece una expresión para su cálculo distinta de la que se muestra en UNE-EN 1337-3. Esto es debido a que la expresión de UNE-EN 15129 tiene en cuenta la compresibilidad del material elastómero bajo presión uniforme en toda su superficie, que en apoyos convencionales no es tan relevante porque el factor de forma S es menor que en aisladores elastoméricos.

$$E_{l,c} = 3G(1 + 2S^2) \quad (11)$$

El módulo de compresibilidad volumétrica, E_b , a falta de datos obtenidos por medición, puede tomarse como $E_b = 2.000$ MPa.

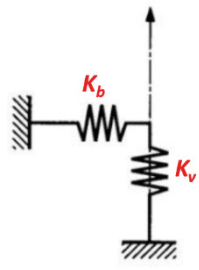

Comentario: la rigidez a compresión de una capa de material elastómero que fuese idealmente incompresible cuando se somete a presión uniforme en toda su superficie se puede caracterizar mediante el módulo de elasticidad longitudinal aparente a compresión $E_{l,c}$ (módulo de Young aparente), que se denomina por simplicidad módulo de compresión suponiendo el material incompresible. $E_{l,c}$ depende del factor de forma, S , y del módulo de elasticidad transversal del material, G , y puede aproximarse con la ecuación (11). En realidad, las capas de elastómero modifican su volumen cuando se someten a presión uniforme y esta deformación se puede caracterizar mediante el módulo de compresibilidad volumétrica, E_b , del material. La expresión (10) proporciona el módulo de elasticidad longitudinal aparente del elastómero, E_c , a compresión teniendo en cuenta la compresibilidad del material, y se le denomina simplemente módulo de compresión del elastómero [14].

7.2.4 Propiedades nominales de los aisladores

7.2.4.1 Rigideces de cálculo de los aisladores sísmicos elastoméricos LDRB

Los apartados 5.3.3.7 de UNE-EN 1337-3 y F.3.3 del anexo F de UNE-EN 15129 establecen las rigideces de los aisladores elastoméricos frente a movimientos horizontales, verticales y rotacionales de eje horizontal, tanto para aisladores rectangulares como circulares:

Tabla 4 Rigideces de aisladores LDRB

Rigidez	Aislador rectangular	Aislador circular	Esquema
Desplazamiento horizontal [kN/m ⁽¹⁾]	$K_b = \frac{F_h}{v_{xy}} = \frac{A \cdot G}{T_q}$		
Desplazamiento vertical [kN/m]	$K_v = \frac{N}{v_z} = \frac{A_l}{\sum t_{i,i} / E_{c,i}}$		
Giro de eje horizontal [kNm/rad]	$K_\theta = \frac{M}{\theta} = \frac{G \cdot a'^5 \cdot b'}{n \cdot t_i^3 \cdot k_R}$	$K_\theta = \frac{M}{\theta} = \frac{\pi \cdot G \cdot D^6}{512 \cdot n \cdot t_i^3}$	

⁽¹⁾ Esta expresión se corresponde con la rigidez horizontal frente a acciones no sísmicas. Frente a acciones sísmicas se debe estimar la rigidez efectiva $K_{eff,b}$ del aislador. Sin embargo, de cara al cálculo, en aisladores tipo LDRB $K_{eff,b}$ puede asumirse constante e igual a K_b (no siendo así en aisladores de gran capacidad de disipación, no cubiertos en esta guía). Ver apartado 7.2.4.2 de esta guía.

donde:

F_h, N, M son la fuerza horizontal, la fuerza vertical y el momento aplicados al aislador elastomérico, respectivamente, en kN y kNm

G valor nominal del módulo de elasticidad transversal del material elastómero (ver el apartado 7.2.3.1 de esta guía), en kN/m²

$E_{c,i}$ valor del módulo de compresión, E_c , de una capa i de elastómero (ver el apartado 7.2.3.2 de esta guía), en kN/m²

v_{xy}, v_z, θ son los desplazamientos y giros correspondientes a F_h, N, M , respectivamente, en metros y radianes

A es el área total del aislador según el apartado 5.3.3.1 de UNE-EN 1337-3 (ver el apartado 7.2.1.1 de esta guía), en m²

- A_I es el área efectiva del aislador según el apartado 5.3.3.1 de UNE-EN 1337-3 (ver el apartado 7.2.1.1 de esta guía), en m^2
- a', b' son los lados superior e inferior del área efectiva en aisladores rectangulares, en metros
- D' es el diámetro correspondiente al área efectiva en aisladores circulares, en metros
- T_q es el espesor total de elastómero que deforma a cortante, en metros
- $t_{i,i}$ es el espesor real de cada capa de elastómero, en metros
- n es el número de capas de elastómero
- k_R factor de forma para aisladores rectangulares que se toma de la tabla 4 de UNE-EN 1337-3 o de la tabla F.3 de UNE-EN 15129

Comentario: de cara a la representación de aisladores en modelos globales de puentes, es práctica habitual considerar la rigidez vertical infinitamente rígida ($K_v = \infty$) y las rotaciones de eje horizontales totalmente libres ($K_\theta = 0$) [5]. Debido a la cada vez más frecuente utilización de aisladores elastoméricos de mayor altura que los apoyos elastoméricos convencionales, se recomienda realizar un análisis de sensibilidad para averiguar cómo varía la respuesta del puente cuando K_v no tiene un valor infinito y K_θ es distinto de cero.

Comentario: según referencias bibliográficas [9], la rigidez a torsión (giro de eje vertical) de un apoyo elastomérico puede expresarse como:

Rigidez	Aislador rectangular	Aislador circular
Torsional o giro de eje vertical [kNm/rad]	$K_\beta = \frac{T}{\beta} = \frac{G \cdot a' \cdot b'^3}{T_q}$	$K_\beta = \frac{T}{\beta} = \frac{G \cdot D'^4}{32 \cdot T_q}$

7.2.4.2 Rigidez y amortiguamiento efectivos de cálculo en aisladores LDRB

Se define la rigidez efectiva horizontal de un aislador, $K_{eff, b}$, como la pendiente de la recta secante a la curva desplazamiento-fuerza horizontal del aislador elastomérico, que pasa por el origen y por el punto de la curva correspondiente al valor de cálculo del desplazamiento, d_{bd} . En general, tras un proceso de carga o descarga la relación desplazamiento-fuerza horizontal no es lineal.

La disipación de energía de un aislador se expresa como fracción de amortiguamiento viscoso lineal equivalente efectivo, $\xi_{eff,b}$, o simplemente amortiguamiento efectivo, que se define mediante la expresión (12) donde E_D es la energía disipada en un ciclo de deformación de amplitud máxima, d_{bd} .

$$\xi_{eff,b} = \frac{1}{2\pi} \frac{E_D}{K_{eff,b} \cdot d_{bd}^2} \quad (12)$$

En el caso de los aisladores elastoméricos de bajo amortiguamiento, la variación experimentada por el módulo de elasticidad transversal es reducida, por lo que los ciclos de deformación son muy esbeltos, lo que significa que la energía disipada es limitada y la rigidez efectiva se mantiene prácticamente constante para cualquier valor de desplazamiento impuesto.

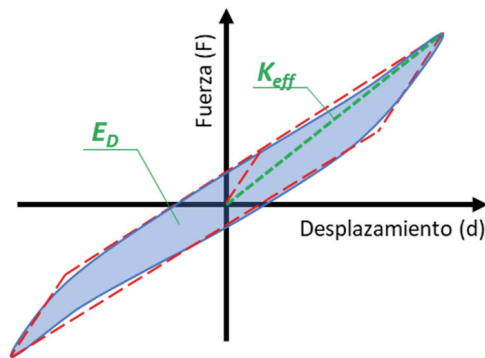


Figura 8 Esquema de rigidez efectiva y energía disipada en un ciclo de deformación esbelto

Según indica el apartado 7.5.1(3) de UNE-EN 1998-2, el cálculo sísmico de puentes con aisladores elastoméricos de bajo amortiguamiento (LDRB) (denominados en dicha norma como "apoyos elastoméricos sencillos de bajo amortiguamiento") podrá realizarse con la metodología del apartado 4.2.1 de dicha norma, es decir, denominado cálculo dinámico lineal utilizando los espectros de respuesta. En este método las leyes fuerza-desplazamiento horizontal a cortante, fuerza-desplazamiento vertical y momento-giro del aislador elastomérico se consideran lineales y elásticas. Es decir, su rigidez efectiva puede considerarse constante y de valor igual a la rigidez lateral, K_b , definida en el apartado 7.2.4 de esta guía (apartado 7.5.2.3.3 (2) de UNE-EN 1998-2). Así mismo, para simplificar se puede considerar que el amortiguamiento viscoso global del puente en su conjunto, ξ_{eff} , proveniente del amortiguamiento efectivo que proporcionan los aisladores elastoméricos y del amortiguamiento inherente que tiene el puente sin los aisladores elastoméricos (véase apartado 4.1.3(1) de EN 1998-2) es del 5 % (apartado 7.5.2.4(5) de UNE-EN 1998-2). De esta forma se pueden emplear directamente los espectros elásticos de respuesta de proyecto de la norma (que están definidos para un amortiguamiento de referencia del 5 %) sin tener que modificarlos por el coeficiente corrector por amortiguamiento η_{eff} (ver figura 2 de esta guía) definido en el apartado 7.5.4 de UNE-EN 1998-2. Obviamente, si el puente incorpora otras fuentes de disipación como son los disipadores de energía, su contribución al amortiguamiento efectivo global del sistema deberán ser tenidas en cuenta, y se puede llegar a niveles de amortiguamiento muy por encima del 5 %.

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

$$K_{eff,b} \approx K_b = \frac{F_h}{u_h} = \frac{A \cdot G}{T_q} \quad (13)$$

La rigidez efectiva del sistema completo, K_{eff} , según el modo fundamental se puede obtener como suma en paralelo de las rigideces laterales de los n_i soportes (apoyo en pilas y estribos). La rigidez de cada soporte se obtiene, a su vez, como suma en serie de las rigideces laterales de pilas o estribos, K_i , y sus correspondientes $n_{b,i}$ aisladores elastoméricos, $K_{b,i}$ por cada pila o estribo:

$$K_{eff} = \sum_i \frac{n_i}{\left(\frac{1}{K_i} + \frac{1}{n_{b,i} \cdot K_{b,i}} \right)} \quad (14)$$

El amortiguamiento efectivo del sistema se puede asumir como aproximadamente el del aislador LDRB:

$$\xi_{eff} \approx \xi_{eff,b} = 0,05 \quad (15)$$

y el factor corrector por amortiguamiento, η_{eff} , valdría:

$$h_{eff} = \sqrt{\frac{10}{5 + \xi_{eff}}} = 1 \quad (16)$$

La obtención del coeficiente η_{eff} permite la definición del espectro de respuesta.

Comentario: dependiendo del material con el que están contruidos los elementos del puente donde se disipa mayor energía de deformación (normalmente en las pilas), el amortiguamiento inherente del puente sin los aisladores elastoméricos puede acercarse al 5 %. En este caso, por pequeño que sea, los aisladores LDRB van a generar un incremento del amortiguamiento total efectivo en el puente y situarlo levemente por encima del 5 %, lo cual podría tenerse en cuenta al aplicar el método dinámico lineal descrito en UNE-EN 1998-2. Si bien, se recomienda despreciarlo.

Comentario: los requisitos de funcionamiento del apartado 8.2.1.2 de UNE-EN 15129 establecen que en el cálculo estructural deben utilizarse las rigideces efectivas garantizadas mediante ensayos según los requisitos 8.2.1.2.2. Si el aislador LDRB se considera sometido a "acciones sísmicas pequeñas" bajo el terremoto de proyecto (cumpliendo para ello las dos condiciones del apartado 8.2.1.2 de esta guía). En este sentido, se recomienda utilizar las propiedades de cálculo de este apartado de la guía, en base a UNE-EN 1998-2, si no hubiera información más precisa, y posteriormente validarlas con las propiedades obtenidas en ensayos.

Comentario: el Eurocódigo 8 de 2.^a generación (prEN 1998-1-1) prevé variaciones en la fórmula de obtención del coeficiente de corrección de amortiguamiento cuando $T \leq T_B$ (con $T > T_B$ se mantiene en uso la expresión (16)), que dependerá adicionalmente del periodo de vibración del sistema T y de la forma del espectro de respuesta (T_A y T_C), donde ξ_{eff} se expresa en porcentaje y en estructuras con aisladores con amortiguamiento viscoso (LDRB y HDRB) puede aproximarse $\xi_{eff} \approx \xi_{eff,b}$:

$$\eta_{eff} = \begin{cases} 1 & \text{si } T \leq T_A \\ \sqrt{\left(10 + \left(\frac{T_B - T}{T_B - T_A}\right)^3 \cdot (\xi_{eff} - 5)\right) / (\xi + 5)} & \text{si } T_A < T < T_B \\ \sqrt{10 / (\xi_{eff} + 5)} & \text{si } T_B \leq T \end{cases} \quad (17)$$

Por último, el periodo efectivo con el que obtener la aceleración de respuesta del sistema con los métodos espectrales del modo fundamental y multimodal se obtiene, en función de la masa total aislada, m , y la rigidez efectiva del sistema, K_{eff} , con la siguiente expresión:

$$T_{eff} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{K_{eff}}} \quad (18)$$

7.2.5 Variabilidad de las propiedades de los aisladores (LBDP y UBDP)

Las propiedades nominales de los aisladores (DP) y, por tanto, las del sistema de aislamiento, pueden verse afectadas por el envejecimiento, la temperatura, la historia de la carga, la contaminación, y los efectos de la acumulación de ciclos de deformación. Por ello, tanto los apartados 4.5.2 y 8.2.1.1 de UNE-EN 15129 como el 7.5.2.4 de UNE-EN 1998-2 establecen la necesidad de analizar la influencia, en los resultados del análisis estructural, de la variación de

las propiedades nominales de los aisladores según se han definido en los apartados anteriores de esta guía (apartados 7.2.3 y 7.2.4), es decir, la variabilidad respecto de las propiedades obtenidas con el módulo de elasticidad transversal nominal, G . Se establecen dos conjuntos de propiedades de cálculo (figura 9):

- Límite inferior del valor de las propiedades del aislador (LBDP): corresponden al valor representativo mínimo en las condiciones en que se obtienen los valores más bajos de las propiedades.
- Límite superior del valor de las propiedades del aislador (UBDP): corresponden al valor representativo máximo en las condiciones en que se obtienen los valores más elevados de las propiedades.

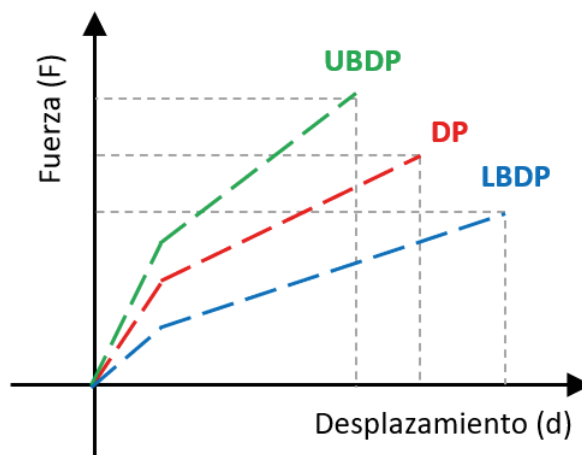


Figura 9 Diagrama esquemático de variabilidad de propiedades

En general, e independientemente del método de cálculo, 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 habitual en aisladores LDRB, pero puede ocurrir con aisladores no lineales (HDRB, LRB o PPRB) 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 7.1) 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). Siendo d_{cd} el desplazamiento sísmico de cálculo del centro de rigidez de la superestructura, que se puede obtener como la suma del desplazamiento sísmico de cálculo de los aisladores, d_{bd} , más el desplazamiento de la subestructura debida a la misma acción sísmica, teniendo en cuenta lo dispuesto en el apartado 7.5.4 UNE-EN 1998-2.

Comentario: del contenido de UNE-EN 1998 y UNE-EN 15129 se entiende que las propiedades UBDP y LBDP también deben usarse para la obtención de los desplazamientos horizontales debidos a los desplazamientos no sísmicos, utilizados para el cálculo del desplazamiento horizontal mayorado, d_{max} (ver apartado 7.3.1 de esta guía).

Comentario: del apartado 7.5.2.4 de UNE-EN 1998-2 se entiende que el requerimiento de que la variabilidad esté en el rango $\pm 15\%$ para no tener que diseñar con las propiedades UBDP y LBDP también se puede demostrar mediante un análisis espectral multimodal, y no únicamente con el método simplificado del modo fundamental.

La norma UNE-EN 15129 establece los siguientes requerimientos en sus apartados 4.5.2 y 8.2.1.1:

- Ambos límites se deben obtener considerando valores cuasi-permanentes de las acciones variables excepto para la temperatura, para la que se debe tener en cuenta el valor frecuente, según se definen en las combinaciones de acciones sísmicas, de acuerdo con UNE-EN 1990.

Comentario: el valor frecuente de la temperatura según UNE-EN 1990 (tabla A2.1) y el Anejo Nacional español (tabla AN.5) en puentes de carretera es de $\psi_2 = 0,6$. Este valor es para considerar la variabilidad de propiedades, y por tanto, no se debe confundir con la combinaciones de cálculo (ver apartado 7.3.1 de esta guía).

Nótese que el valor mínimo de la temperatura del aislador deberá obtenerse según la expresión del apartado J.1(2) del Anejo Nacional español de UNE-EN 1998-2.

- La relación entre los valores de cálculo LBDP y UBDP de los aisladores debe ser inferior a 1,8.
- En aisladores elastoméricos LRBD que no se considere que están sometidos a "acciones sísmicas pequeñas" bajo el terremoto de proyecto: los límites LBDP y UBDP de una propiedad son valores representativos obtenidos a partir de ensayos de tipo. Se obtienen por combinación de las tres variaciones siguientes:
 - *Variabilidad por envejecimiento* (λ_{f1}): de acuerdo con la vida útil, según el requisito de funcionamiento del apartado 8.2.1.2.9 (ver apartado 8.2.1.2.1 de esta guía). Se utilizará un coeficiente de combinación de variabilidades de $\psi_{f1} = 1,0$ para combinar esta variabilidad con las otras dos.
 - *Variabilidad por cambios de temperatura* (λ_{f2}): variación entre T_U y T_L , referidos a los valores de servicio de la temperatura según UNE-EN 1991-1-5, según el requisito de funcionamiento del apartado 8.2.1.2.4 (ver apartado 8.2.1.2.1 de esta guía). Cuando sea apropiado, se deberá tener en cuenta la variabilidad por

cristalización a baja temperatura, según el requisito de materiales del apartado 8.2.2.1.5 (ver apartado 8.2.1.2.1 de esta guía). Se utilizará un coeficiente de combinación de variabilidades de $\psi_{f2} = 0,7$ para combinar esta variabilidad con las otras dos.

- *Variabilidad de producción (λ_{f5})*: tolerancia de $\pm 20\%$ para el control de producción en fábrica (salvo que se acuerde una variabilidad inferior). Se utilizará un coeficiente de combinación de variabilidades de $\psi_{f5} = 0,7$ para combinar esta variabilidad con las otras dos.

Comentario: el anexo J (Informativo) de UNE-EN 15129 incluye variabilidades de contaminación (λ_{f3}) y recorrido acumulativo (λ_{f4}). Se entiende (a falta de información adicional) que el cuerpo de la norma no lo incluye por ser su factor de variabilidad igual a 1, es decir, sin afección. Se recomienda corroborar con el fabricante, en cumplimiento de UNE-EN 15129.

- En aisladores elastoméricos LDRB que se considere que están sometidos a "acciones sísmicas pequeñas" bajo el terremoto de proyecto (cumpliéndose por lo tanto las dos condiciones de artículo 8.2.1.1 de UNE-EN 15129): los límites LBDP y UBDP de una propiedad son valores representativos obtenidos a partir de ensayos de tipo. Se variará la propiedad de rigidez efectiva, $K_{eff,b}$, obtenida según el requisito de funcionamiento 8.2.1.2.11 (ver apartado 8.2.1.2.2 de esta guía) y se tendrán en cuenta las tres variaciones siguientes:
 - *Variabilidad por envejecimiento (λ_{f1})*: según la variación del módulo de elasticidad transversal convencional de acuerdo con el apartado 4.3.1.1 de UNE-EN 1337-3 (para valores de G_g de 0,9-0,7-1,15 MPa: $G_g = 0,9 \pm 0,15$ MPa; $G_g = 0,7 \pm 0,10$ MPa; $G_g = 1,15 \pm 0,20$ MPa).
 - *Variabilidad por cambios de temperatura (λ_{f2})*: variación entre T_U y T_L , referidos a los valores de servicio de la temperatura según UNE-EN 1991-1-5, según el requisito de funcionamiento del apartado 8.2.1.2.4 (ver apartado 8.2.1.2.1 de esta guía).
 - *Variabilidad de producción (λ_{f5})*: según la tolerancia de fabricación para el módulo de elasticidad transversal convencional de acuerdo con el apartado 4.3.1.1 de UNE-EN 1337-3.

Comentario: si bien UNE-EN 15129 no lo especifica de forma particular, se entiende que los factores de variabilidad (λ_{f1} , λ_{f2} , y λ_{f5}) en aisladores LDRB que se considere que están sometidos a "acciones sísmicas pequeñas" se combinan con los mismos factores de combinación que en aisladores LDRB que se considere que no están sometidos a "acciones sísmicas pequeñas" bajo el terremoto de proyecto ($\psi_{f1} = 1,0$; $\psi_{f2} = 0,7$; $\psi_{f5} = 0,7$).

7.2.5.1 Estimación analítica de la variabilidad de las propiedades

Ante la posibilidad de que no se disponga de información de la variabilidad de las propiedades durante la fase de redacción de proyecto, el apartado 8.1 (nota 8) de UNE-EN 15129 indica que las estimaciones preliminares para el cálculo podrán realizarse analíticamente según el anexo J de dicha norma, de carácter informativo. Las tablas incluidas en dicho anexo presentan valores distintos a las del anexo JJ de UNE-EN 1998-2 para el mismo propósito (de tipo informativo en UNE-EN 1998-2, pero con carácter normativo en España según se especifica en el apartado J.1(2) del Anejo Nacional). Para facilitar la distinción, en este apartado, el contenido extraído UNE-EN 15129 y el contenido extraído de UNE-EN 1998-2, se destacan en diferente color, empleando el **color verde** para el segundo.

Factores de variabilidad, λ_{fi} :

Se muestra a continuación una simplificación de las tablas de UNE-EN 15129 (anexo J) y UNE-EN 1998-2 (anexo JJ) de los factores de variabilidad de propiedades $\lambda_{max,fi}$ y $\lambda_{min,fi}$ (λ_{fi} relativos a UBDP y LBDP, respectivamente), teniendo en cuenta que, para aisladores LDRB, el amortiguamiento se asume equivalente al de la estructura y, por tanto, la propiedad a variar será la rigidez lateral K_b , (o efectiva $K_{eff,b}$), a través del módulo de elasticidad transversal nominal, G .

Tabla 5 Factor de variabilidad de envejecimiento para K_b

Envejecimiento (λ_{f1})			
UNE-EN 15129 (anexo J)		UNE-EN 1998-2 (anexo JJ)	
UBDP ($\lambda_{max,fi}$)	LBDP ($\lambda_{min,fi}$)	UBDP ($\lambda_{max,fi}$)	LBDP ($\lambda_{min,fi}$)
1,1	—	1,1	1,0

Tabla 6 Factor de variabilidad de temperatura para K_b

Temperatura (λ_{f2})				
$T_{min,b}$ (°C)	UNE-EN 15129 (anexo J)		UNE-EN 1998-2 (anexo JJ)	
	UBDP ($\lambda_{max,fi}$)	LBDP ($\lambda_{min,fi}$)	UBDP ($\lambda_{max,fi}$)	LBDP ($\lambda_{min,fi}$)
20	1,0	—	1,0	1,0
0	1,3	—	1,1	1,0
-10	1,4	—	1,1	1,0
-30	1,5	—	1,3	1,0

$T_{min,b}$ es la temperatura mínima del aislador para la situación sísmica de cálculo, correspondiente al emplazamiento del puente según el apartado J.1(2) del Anejo Nacional español de UNE-EN 1998-2. No confundir con la temperatura mínima en servicio, T_L , según UNE-EN 1991-1-5, que se utiliza para analizar para obtener d_{max} (ver apartado 7.3.1.2 de esta guía) y para analizar en ensayos de tipo el efecto de las temperaturas sobre las propiedades horizontales del aislador (ver apartado 8.2.2.1 de esta guía).

Tabla 7 Factor de variabilidad de contaminación para K_b

Contaminación (λ_{f3})			
UNE-EN 15129 (anexo J)		UNE-EN 1998-2 (anexo JJ)	
UBDP ($\lambda_{max,fi}$)	LBDP ($\lambda_{min,fi}$)	UBDP ($\lambda_{max,fi}$)	LBDP ($\lambda_{min,fi}$)
1,0	—	1,0	1,0

Tabla 8 Factor de variabilidad de recorrido acumulativo para K_b

Recorrido acumulativo (desgaste) (λ_{f4})			
UNE-EN 15129 (anexo J)		UNE-EN 1998-2 (anexo JJ)	
UBDP ($\lambda_{max,fi}$)	LBDP ($\lambda_{min,fi}$)	UBDP ($\lambda_{max,fi}$)	LBDP ($\lambda_{min,fi}$)
1,0	—	1,0	1,0

Tabla 9 Factor de variabilidad de producción para K_b

Producción (λ_{f5})			
UNE-EN 15129 (8.2.1.1)		UNE-EN 1998-2 (anexo JJ)	
UBDP ($\lambda_{max,fi}$)	LBDP ($\lambda_{min,fi}$)	UBDP ($\lambda_{max,fi}$)	LBDP ($\lambda_{min,fi}$)
1,2	0,8	—	—

Notas:

- La notación λ_{f5} para la variabilidad de producción no aparece en las normas, y se incluye en esta guía con voluntad aclarativa.
- El factor de variabilidad de producción no está contemplado en UNE-EN 1998-2.

Los factores de variabilidad obtenidos mediante las tablas son de aplicación, con carácter estimativo, en aisladores LDRB con módulo de elasticidad transversal $G \geq 0,5$ MPa. Siendo G el correspondiente a amplitudes de deformación tangencial del 100 %.

Comentario: los valores de los factores de variabilidad del anejo JJ de UNE-EN 1998-2 son informativos, pero son los adoptados por el Anejo Nacional de UNE-EN 1998-2 en España. Dado que UNE-EN 1998-2 es una norma de proyecto y UNE-EN 15129 es una norma de producto, la primera tiene más rango, por lo tanto, se debe adoptar, como mínimo, los valores del anejo JJ del UNE-EN 1998-2. Será criterio del proyectista la adopción directa de los factores de variabilidad de UNE-EN 1998-2 o una solución envolvente que tenga en cuenta aquellos casos en los que los factores de UNE-EN 15129 aportan un resultado más conservador.

Nótese que los factores de variabilidad para el límite inferior de las propiedades (LBDP) son siempre de valor igual a 1 (expresión J.6 de UNE-EN 1998-2), por lo que, de cara a la estimación de su variación, los límites inferiores de propiedades serán iguales a los nominales, excepto si se considera la variabilidad de producción (no contemplada en

UNE-EN 1998-2 pero sí en UNE-EN 15129). El apartado J.2(3) de UNE-EN 1998-2 indica que, por lo general, puede considerarse que $LBDP = DP$. Sin embargo, a falta de información más detallada, se recomienda, del lado de la seguridad, tener en cuenta la variabilidad de producción de $\pm 20\%$ ($\lambda_{f5,LBDP} = 0,8$), según UNE-EN 15129, para la determinación de las propiedades LBDP.

Si se desconoce el valor de G , ya sea por falta de referencia de un fabricante o por ausencia de ensayos, se recomienda que, para la obtención de los desplazamientos y fuerzas sísmicas de las comprobaciones de UNE-EN 15129, la variabilidad de propiedades incluya el rango de coeficiente de cortante dinámico, α , comprendido entre 1,00 y 1,40, según el apartado 7.5.2.4 de UNE-EN 1998-2 (ver apartado 7.2.3.1 de esta guía), de tal forma que $\lambda_{fi,UBDP}$ se aplique sobre la superior de G ($G_{UBDP} = 1,40 \cdot G_g \cdot \lambda_{fi,LBDP}$) y $\lambda_{fi,LBDP}$ se aplique sobre la superior de G ($G_{LBDP} = 1,00 \cdot G_g \cdot \lambda_{fi,LBDP}$). Esta consideración es coherente con el hecho de que el requerimiento de considerar $G = \alpha G_g$ como propiedad nominal esté incluido dentro del apartado 7.5.2.4 de UNE-EN 1998-2 relativo a la variabilidad de las propiedades en aisladores.

Combinación de variabilidad de propiedades, ψ_{fi}

Se muestra a continuación una tabla de coeficientes de combinación de variabilidad de propiedades, según UNE-EN 15129 (apartado 8.2.1.1) y UNE-EN 1998-2 (anexo J). Se detectan diferencias entre ambas normas, siendo la principal que los factores de combinación dependen de la clase de importancia (I, II o III) del puente según el apartado 2.1(4) de UNE-EN 1998-2.

Tabla 10 Coeficientes de combinación de variabilidad de propiedades

Coeficiente de combinación ψ_{fi}				
Propiedad	UNE-EN 15129 (8.2.1.1)	UNE-EN 1998-2 (anexo J)		
		Clase I	Clase II	Clase III
Envejecimiento (ψ_{f1})	1,0	0,60	0,70	0,90
Temperatura (ψ_{f2})	0,7			
Producción (ψ_{f5})	0,7	—	—	—

Notas:

- No se incluyen las propiedades de contaminación y recorrido acumulativo debido a que sus factores de variabilidad son igual a 1.
- El factor de variabilidad de producción no está contemplado en UNE-EN 1998-2.

El anexo J de UNE-EN 1998-2 establece la formulación para combinar los factores de variabilidad, λ_{fi} , según los coeficientes de combinación, ψ_{fi} , para obtener los coeficientes de modificación de cada tipo de variabilidad de propiedad (λ_{Ufi} , superior; λ_{Lfi} , inferior). Con ellos, se obtienen los valores límite de las propiedades, superior (UBDP) e inferior (LBDP), a partir de las nominales (DP).

Para cada variabilidad de propiedad:

$$\lambda_{U,fi} = 1 + (\lambda_{fi,UBDP} - 1) \psi_{fi,UBDP} \quad (19)$$

$$\lambda_{L,fi} = 1 + (\lambda_{fi,LBDP} - 1) \psi_{fi,LBDP} \quad (20)$$

Para cada límite:

$$UBDP = DP \cdot \lambda_{U,f1} \cdot \lambda_{U,f2} \cdot \lambda_{U,f3} \cdot \lambda_{U,f4} \cdot \lambda_{U,f5} \quad (21)$$

$$LBDP = DP \cdot \lambda_{L,f1} \cdot \lambda_{L,f2} \cdot \lambda_{L,f3} \cdot \lambda_{L,f4} \cdot \lambda_{L,f5} \quad (22)$$

Comentario: los valores de los factores de variabilidad del anejo J de EN 1998-2 son informativos, pero el apartado J.1(2) del Anejo Nacional los convierte en normativos en España. Dado que UNE-EN 1998-2 es una norma de proyecto y UNE-EN 15129 es una norma de producto, la primera tiene más rango, por lo tanto, se deben adoptar, como mínimo, los valores del anejo J del EN 1998-2. Será criterio del proyectista la adopción directamente de los factores de combinación de UNE-EN 1998-2 o una solución envolvente que tenga en cuenta aquellos casos en los que los factores de UNE-EN 15129 aportan un resultado más conservador.

Comentario: en apoyos elastoméricos “sencillos” de bajo amortiguamiento según UNE-EN 1998-2, se podrá realizar la siguiente simplificación indicada en el apartado 7.5.2.4(6):

$$UBDP = DP \cdot 1,2 \quad (23)$$

$$LBDP = DP \quad (24)$$

7.2.6 Elastómeros en aisladores LDRB que se consideran sometidos a “acciones sísmicas pequeñas”

Cuando se considere que las acciones sísmicas sobre el LDRB bajo el terremoto de proyecto son pequeñas (cumpliéndose en ese caso las dos condiciones que se indican en el apartado 4.1 de esta guía), el apartado 8.2.2.1.1 de UNE-EN 15129 establece que basta con garantizar el cumplimiento de los requisitos del material elastoméricos según UNE-EN 1337-3.

7.3 Comprobaciones

Los aisladores elastoméricos son apoyos elastoméricos diseñados acorde a las normas UNE-EN 1337-3 y UNE-EN 15129, por lo que deben realizarse las comprobaciones que se incluyen en ambas:

- *Comprobaciones de deformaciones tangenciales:* se define un límite para la suma de las deformaciones de cálculo debido a las cargas de compresión, $\varepsilon_{c,E}$, debido a los movimientos de translación, $\varepsilon_{q,d}$ y $\varepsilon_{q,max}$, y debido a rotación angular, $\varepsilon_{\alpha,d}$.
- *Espesor mínimo de las placas de acero, t_s :* se define el valor mínimo para el espesor de las placas de zunchado de acero que deben ser capaces de resistir las tensiones normales de tracción introducidas por los varios estados de carga.
- *Criterios de estabilidad:* los aisladores elastoméricos deben cumplir con varios criterios relativos a la rotación, torsión, deslizamiento, inestabilidad por pandeo de flexión lateral e inestabilidad de rodamiento.

Todas las comprobaciones deben ser realizadas teniendo en cuenta fuerzas, movimientos y giros de cálculo.

Según se indica en el apartado 8.2.3.3.1 de UNE-EN 15129, el valor del módulo de elasticidad transversal, G , que se utiliza en las comprobaciones según UNE-EN 15129, será el obtenido mediante ensayo cíclico frente a una deformación tangencial del 100 % según el apartado 8.2.2.1.3.2 de UNE-EN 15129, es decir, el dinámico. En caso de desconocimiento de dicho valor, se propone utilizar el valor $G = \alpha G_g$ propuesto en el apartado 7.5.2.4(5) de UNE-EN 1998-2 (ver apartados 7.2.3.1 y 8.3.1 de esta guía) o bien imponer un valor de G (dinámico) a nivel de proyecto.

En los apartados a continuación se exponen en detalle las comprobaciones exigidas por la norma UNE-EN 15129 para la verificación de los aisladores elastoméricos. Las comprobaciones relativas a combinaciones no sísmicas pueden consultarse en la *Guía para el cálculo de apoyos elastoméricos* [19].

7.3.1 Combinaciones de acciones para las comprobaciones

7.3.1.1 Combinación sísmica de cálculo según UNE-EN 1990

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:

$$G_k + P + \sum \psi_{2,i} Q_i + A_E \quad (25)$$

donde:

- G_k acciones permanentes y diferidas
- P acción de pretensado que provoca reacciones verticales o giros debidos a los efectos hiperestáticos del postesado (si los hubiera), en valor característico
- $\psi_{2,i}Q_i$ valor cuasipermanente de las acciones variables en valor característico. 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 sobrecargas de construcción ($\psi_2 = 1,0$)
- A_E 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

Comentario: no confundir el término para representar las acciones permanentes G_k utilizado en UNE-EN 1990 con el desplazamiento inicial por acciones no sísmicas d_G utilizado en UNE-EN 1998-2 (y en el apartado 7.3.1.2 de esta guía), que incluye otras acciones además de las permanentes. Por coherencia con las normativas de procedencia, en esta guía se mantiene la nomenclatura original, pero para denominar los efectos de las acciones permanentes se utilizan los términos N_{CP} , α_{CP} y d_{CP} .

7.3.1.2 Reacciones verticales y giros

Las comprobaciones que tienen en cuenta reacciones verticales sobre los aisladores elastoméricos ($N_{Ed,max}$, $N_{Ed,min}$) y giros de los mismos, se obtienen sumando los efectos de la combinación de acciones sísmicas de la expresión (25), según se muestra en las expresiones (26) y (27):

$$N_{Ed} = N_{CP} + N_P + \sum \psi_{2,i} N_{Q_i} + N_{A_E} \quad (26)$$

$$\alpha_{Ed} = \alpha_{CP} + \alpha_P + \sum \psi_{2,i} \alpha_{Q_i} + \alpha_{A_E} \quad (27)$$

donde:

N_{CP} , N_P , N_{Q_i} , N_{A_E} representan las reacciones verticales debidas a las cargas permanentes, pretensado, cargas variables y acción sísmica, respectivamente

α_{CP} , α_P , α_{Q_i} , α_{A_E} representan los giros de ejes horizontales debidos a las cargas permanentes, pretensado, cargas variables y acción sísmica, respectivamente

7.3.1.3 Desplazamiento horizontal máximo d_{max}

Los desplazamientos que se utilizan en las comprobaciones de los aisladores tienen una definición particular. 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 el desplazamiento d_{bd} en la dirección considerada provocado por la acción sísmica $A_{E,d}$, mayorado por el coeficiente de amplificación por fiabilidad, γ_x , con desplazamientos en la dirección considerada debidos a las acciones no sísmicas en situación sísmica, d_G , según los apartados 7.6.2 de UNE-EN 1998-2 y 8.1 de UNE-EN 15129 (ver apartado 6.2 de esta guía), que se define como:

$$d_{max} = \gamma_x d_{bd} + d_G = \gamma_x d_{bd} + d_{CP} + d_P + d_\mu + 0,5 d_T \quad (28)$$

donde:

- d_{max} desplazamiento horizontal máximo de cada aislador
- d_{bd} valor de cálculo de desplazamiento sísmico horizontal de cada aislador cuando el sismo actúa en una dirección principal, X o Y , es decir, la comprobación se debe realizar en cada dirección principal por separado. En cada dirección, d_{bd} si 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 en la vertical, tras combinar las direcciones según la regla $d_{bd,x} + 0,3 \cdot d_{bd,y} + 0,3 \cdot d_{bd,z}$ y $0,3 \cdot d_{bd,x} + d_{bd,y} + 0,3 \cdot d_{bd,z}$, o la regla de combinación SRSS del apartado 5.3.3.5 de UNE-EN 1998-1. Es decir, no se suman vectorialmente desplazamientos en direcciones perpendiculares
- γ_x coeficiente de mayoración por fiabilidad aumentada, 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
- d_G 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} es el desplazamiento debido a acciones permanentes, no mayorado
 - d_P es el desplazamiento debido al acortamiento elástico del pretensado (en caso de haberlo), no mayorado
 - d_∞ es la deformación a largo plazo de la superestructura (retracción, fluencia y pérdidas diferidas de pretensado), no mayorado
 - $0,5 d_T$ es el 50 % de la deformación por acción térmica según UNE-EN 1991-1-5, no mayorado

En aisladores elastoméricos "sencillos" según el apartado 7.6.2(6) de UNE-EN 1998-2 (ver apartado 4.1 de esta guía), la expresión (28) se aplica en cada dirección principal ($d_{max,x}$, $d_{max,y}$)

y luego se suman vectorialmente para obtener $v_{xy,d}$, que es el desplazamiento de cálculo que se utiliza en las comprobaciones pertinentes ($v_{xy,d} = (d_{max,x}^2 + d_{max,y}^2)^{0,5}$). Esto implica que, en aisladores "sencillos", las comprobaciones se realizan con un desplazamiento que puede llegar a ser hasta 1,4 veces mayor, para compensar que las verificaciones de cálculo y los ensayos son menos exigentes.

El formato de la expresión (28), que amplifica los efectos horizontales de la acción sísmica por el coeficiente de amplificación por fiabilidad, γ_x , también se utiliza para obtener el cortante o fuerza horizontal de cálculo, F_{UB} , de dimensionamiento de las uniones y anclajes en aisladores elastoméricos, según el procedimiento que se explica en el apartado 7.3.7 de esta guía.

Comentario: en puentes el valor de cálculo del desplazamiento horizontal total máximo, d_{Ed} , es igual al desplazamiento máximo de un aislador d_{max} . La norma UNE-EN 15129 utiliza ambas nomenclaturas para referirse a lo mismo. En esta guía se priorizará el uso de d_{max} .

Comentario: conviene enfatizar que los apartados 7.6.2(2) UNE-EN 1998-2 y 3.1.2 de UNE-EN 15129 indican que los desplazamientos de las comprobaciones específicas de aisladores deben realizarse en las dos direcciones principales consideradas, que en un puente generalmente coincidirán con la longitudinal y transversal del tablero (pero podrían adoptarse otras si el sismo se aplicara también en ellas). Esto significa que las comprobaciones, según UNE-EN 1998 y UNE-EN 15129 no se realizan en la dirección más crítica, que se correspondería con la suma vectorial de desplazamiento máximo en las dos direcciones principales según las reglas de combinación de direcciones de UNE-EN 1998-1. La *Guía de cálculo sísmico de puentes del Eurocódigo 8* ([26] *Designers' guide to Eurocode 8: design of bridges for earthquake resistance*) confirma el criterio de comprobación en la dirección principal que marcan UNE-EN 1998-2 y UNE-EN 15129, pero indica, en su apartado 8.4.12, que ello puede no ser adecuado cuando los aisladores tienen igual capacidad de desplazamiento en todas las direcciones. Se llega a estas conclusiones tras comparar los resultados de modelos sometidos a cálculos dinámicos directos en el dominio del tiempo con los obtenidos mediante la aplicación del método del modo fundamental según UNE-EN 1998 (en la dirección principal), obteniendo mayores desplazamientos totales en el cálculo dinámico directo que los obtenidos en la dirección principal mediante el método del modo fundamental. Para corregir esta desviación la guía [26] desarrolla las siguientes propuestas no normativas:

- Incrementar el espectro elástico de respuesta por un factor de valor entre 1,25 y 1,30. Reconoce que esto da lugar a resultados conservadores.
- Incrementar el desplazamiento sísmico horizontal, d_{bd} , resultante en la dirección principal considerada por un factor de valor entre 1,15 y 1,25. Este incremento es equivalente a considerar concomitante un desplazamiento transversal del orden del 57-75 % del que se obtiene en la dirección principal.
- Realizar un cálculo dinámico directo en el dominio del tiempo y adoptar el valor máximo de desplazamiento. Esta metodología es de compleja aplicación y requiere una gran experiencia en la selección de acelerogramas representativos del sitio.

La norma americana AASHTO [7] realiza las comprobaciones con el desplazamiento máximo horizontal, estimado como la composición vectorial de los máximos en cada dirección principal, siguiendo la regla del del 100% en una dirección concomitante con el 30% en la otra ($Sismo_x + 0,30 \cdot Sismo_y$; $0,30 \cdot Sismo_x + Sismo_y$). Esta es la misma regla de combinación de direcciones que se describe en apartado 4.3.3.5.2(4) de UNE-EN 1998-1 para estimar desplazamiento máximo horizontal.

7.3.2 Deformación tangencial máxima de cálculo

El apartado 8.2.3.4.2 de UNE-EN 15129 establece la deformación tangencial total máxima de cálculo, $\varepsilon_{t,d}$, como suma de las deformaciones de cálculo debido a las cargas de compresión, a los movimientos de translación y a la rotación angular del apoyo; y no debe superar un límite establecido dado por la expresión (27):

$$\varepsilon_{t,d} = K_L(\varepsilon_{c,EI} + \varepsilon_{q,max} + \varepsilon_{\alpha,d}) \leq \frac{7,0}{\gamma_m} \quad (29)$$

donde:

- K_L es un factor del tipo de carga, definido en el anexo C de UNE-EN 1337-3. De acuerdo con dicho anexo, K_L es igual a 1,0; no obstante, por requerimiento del proyectista, puede tomarse como 1,5 para sobrecargas y 1,0 para el resto de los efectos, incluyendo el viento y la temperatura
- $\varepsilon_{c,EI}$ es la deformación tangencial de cálculo debida a las cargas de compresión (ver apartado 7.3.2.1 de esta guía)
- $\varepsilon_{q,max}$ es la deformación tangencial de cálculo debido a los movimientos de translación (ver apartado 7.3.2.2 de esta guía)
- $\varepsilon_{\alpha,d}$ es la deformación tangencial de cálculo debida a la rotación angular (ver apartado 7.3.2.3 de esta guía)
- γ_m es el coeficiente parcial relativo al material elastomérico. La norma UNE-EN 15129 recomienda adoptar 1,0 como valor de γ_m (también en 5.3.3 de UNE-EN 1337-3 y 7.6.2(5) de UNE-EN 1998-2 y correspondiente Anejo Nacional).

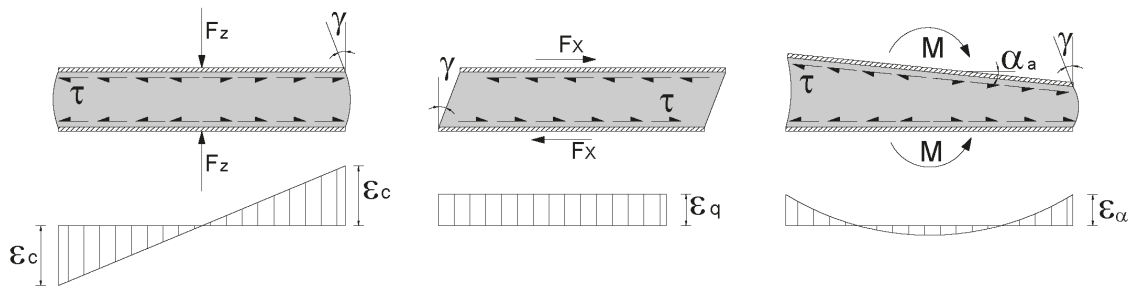


Figura 10 Deformaciones tangenciales producidas por fuerzas verticales de compresión, por deformaciones horizontales y por giros (respectivamente, de izquierda a derecha)

Comentario: aunque a las deformaciones tangenciales se las designa normalmente con la letra griega γ , siguiendo el criterio de UNE-EN 15129 y para no confundirlo con los coeficientes parciales, en todo el documento se emplea la letra ε para designar tanto deformaciones normales como tangenciales.

Frente a acciones no sísmicas los aisladores deberán comprobarse a deformaciones tangenciales según UNE-EN 1337-3. Dichas comprobaciones se desarrollan ampliamente en la *Guía para el cálculo de apoyos elastoméricos* [19], y se resumen a continuación:

- La deformación tangencial máxima frente a acciones no sísmicas se comprueba y limita según el apartado 5.3.3 de UNE-EN 1337-3.
- La deformación tangencial por cargas verticales de compresión se calcula según el apartado 5.3.3.2 de UNE-EN 1337-3.
- La deformación tangencial por desplazamientos horizontales frente a acciones no sísmicas se calcula según el apartado 5.3.3.3 de UNE-EN 1337-3.
- La deformación tangencial por rotación angular de eje horizontal frente a acciones no sísmicas se calcula según el apartado 5.3.3.4 de UNE-EN 1337-3.

Comentario: en aisladores elastoméricos "sencillos" de bajo amortiguamiento según UNE-EN 1998-2, la expresión del apartado 5.3.3 de UNE-EN 1337-3, equivalente a la expresión (29) de esta guía, deberá comprobarse también teniendo en cuenta la combinación sísmica según el apartado 7.3.1 de esta guía para el desplazamiento de cálculo $v_{xy,d}$ (ver *Guía para el cálculo de apoyos elastoméricos* [19]).

7.3.2.1 Deformación tangencial de cálculo debida a la carga de compresión, $\varepsilon_{c,EI}$

La deformación tangencial de cálculo debido a cargas verticales de compresión que actúan sobre el aislador se calcula según el apartado 8.2.3.3.2 de UNE-EN 15129 mediante la siguiente expresión:

$$\varepsilon_{c,EI} = \frac{6 \cdot S \cdot N_{Ed,max}}{A_r \cdot E_{I,c}} \quad (30)$$

donde:

- $N_{Ed,max}$ es la carga vertical máxima de cálculo en combinación sísmica obtenida según la expresión (26), en kN
- 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 7.2.1.1 de esta guía), en m²
- S es el factor de forma de una capa individual de elastómero (ver apartado 7.2.2 de esta guía)
- $E_{I,c}$ es el módulo de compresión suponiendo el material elastómero incompresible bajo presión uniforme en toda su superficie, de una capa de elastómero (ver apartado 7.2.3.2 de esta guía), en kN/m²

7.3.2.2 Deformación tangencial debida al desplazamiento horizontal, $\varepsilon_{q,max}$

La deformación tangencial de cálculo por desplazamiento horizontal en aisladores LDRB se calcula según el apartado 8.2.3.3.3 de UNE-EN 15129 a partir del desplazamiento máximo, d_{max} , obtenido con la expresión (26), y en general debe cumplir $\varepsilon_{q,max} \leq 2,5$.

En el caso particular de que se quiera eximir al aislador LDRB del cumplimiento de los requisitos que establece UNE-EN 15129 (salvo el 8.2.1.2.11; los 8.2.1.2.2, 8.2.1.2.4, 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), porque se considere que está sometido a "acciones sísmicas pequeñas" bajo el terremoto de proyecto (cumpliéndose por lo tanto las dos condiciones indicadas en el apartado 4.1 de esta guía), la limitación es que $\varepsilon_{q,max} \leq 2,0$ según el apartado 8.2.1.2.11 de UNE-EN 15129.

$$\varepsilon_{q,max} = \frac{d_{max}}{T_q} \leq \begin{cases} 2,5 & \text{si no se considera sometido a "acciones sísmicas pequeñas"} \\ 2,0 & \text{si se considera sometido a "acciones sísmicas pequeñas"} \end{cases} \quad (31)$$

donde:

d_{max} es el desplazamiento horizontal máximo de cada aislador en una dirección principal (igual a d_{Ed} en puentes) (ver apartado 7.3.1 de esta guía), en m (o mm)

T_q es el espesor total de elastómero activo que deforma a cortante, en m (o mm)

Comentario: se recomienda verificar en proyecto que los desplazamientos y deformaciones tangenciales resultantes sean asumibles por los fabricantes de aisladores elastoméricos más habituales. De lo contrario, pueden encontrarse dificultades de disponibilidad de maquinaria y recursos técnicos para la realización de los ensayos de tipo y de control de producción en fábrica (ver apartado 8.2.2 de esta guía).

Comentario: en apoyos elastoméricos “sencillos” de bajo amortiguamiento según UNE-EN 1998-2, la deformación máxima debidas al desplazamiento horizontal de cálculo ($\varepsilon_q = v_{xy,d}/T_q$) debe ser inferior al 200%, $\varepsilon_q \leq 2$, (con $v_{xy,d} = (d_{max,x}^2 + d_{max,y}^2)^{0.5}$), según el apartado 7.6.2(6) de UNE EN 1998 2.

7.3.2.3 Deformación tangencial debida a la rotación angular de eje horizontal, $\varepsilon_{\alpha,d}$

La norma UNE-EN 15129 indica en el apartado 8.2.3.4.2 que se debe obtener utilizando la expresión de UNE-EN 1337 en combinación sísmica según UNE-EN 1990, con la particularidad de que se debe asumir un ángulo de rotación mínimo de 0,003 radianes para cada dirección ortogonal. La determinación de la deformación tangencial de cálculo debida a la rotación angular se define en el apartado 5.3.3.4 de UNE-EN 1337 mediante la siguiente expresión:

$$\varepsilon_{\alpha,d} = \frac{(a'^2 \cdot \alpha_{a,d} + b'^2 \cdot \alpha_{b,d}) t_i}{2 \sum t_i^3} \quad (32)$$

donde:

$\alpha_{a,d}$ es el ángulo de rotación sobre un eje paralelo a la dimensión a del apoyo, debido a los efectos de las acciones de la combinación sísmica según la expresión (25) ($\alpha_{a,d} \geq 0,003$ rad), en rad

$\alpha_{b,d}$ es el ángulo de rotación sobre un eje paralelo a la dimensión b del apoyo, debido a los efectos de las acciones de la combinación sísmica según la expresión (25) ($\alpha_{a,d} \geq 0,003$ 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 ($\sum t_i^3 = n \cdot t_i^3$)

Comentario: la expresión (30) que se recoge en el apartado 5.3.3.4 de UNE-EN 1337-3 es directamente aplicable a apoyos rectangulares. En el caso de apoyos circulares, se podrá sustituir a' y b' por D' , obteniendo un resultado conservador. En la versión más avanzada, a fecha de redacción de esta guía, del borrador (año 2018) de la 2.ª generación de la norma EN 1337-3, se incluye la siguiente expresión para la determinación de la deformación tangencial debida a la rotación angular en apoyos circulares. La utilización de la expresión (31) proporciona valores más reducidos que la expresión vigente (30), si bien, se entiende que más precisos al tratarse de una norma más avanzada.

$$\varepsilon_{\alpha,d} = \frac{D'^2 \cdot \alpha_{ab,d} \cdot t_i}{2 \sum t_i^3} \quad (33)$$

donde:

$$\alpha_{ab,d} = \sqrt{\alpha_{a,d}^2 + \alpha_{b,d}^2}$$

7.3.3 Deformación de tracción máxima

La norma UNE-EN 15129 indica en el apartado 8.2.1.2.7 que son admisibles valores de carga vertical mínima, $N_{Ed,min}$, que sean de tracción siempre que las tensiones que se generen no superen un 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 (ver apartados 7.2.3.1 y 8.3.1 de esta guía). Se limitan las tensiones de tracción a $2G$ para evitar los efectos de cavitación que se producen en el caucho frente a esfuerzos de tracción relativamente bajos [10].

Comentario: aunque UNE-EN 15129 permite tracciones de hasta $2G$, es aconsejable evitar que se produzcan. Una posible forma de evitar las tracciones es mediante la colocación de topes anti-levantamiento, como, por ejemplo, el que se define en la *Guía para el cálculo de apoyos elastoméricos. Ejemplo de aplicación* [20].

Si bien no es un fenómeno indicado en la norma, se entiende que en aisladores comprimidos pueden llegar a producirse tracciones locales debidas a una rotación concomitante con una carga vertical de pequeño tamaño (por ejemplo, en apoyos de estribo). Es aconsejable valorar cualitativamente, mediante la rigidez a flexión indicada en la tabla 4 de esta guía, que las tracciones locales no superan valores de $2G$. En caso de no cumplir, se pueden utilizar uniones especiales entre aislador y estructura que eliminan la posibilidad de que los giros impuestos sobre el aislador produzcan tracciones, como por ejemplo las fijaciones no normalizadas de empotramiento del aislador en huecos mecanizados en las placas de anclaje o mediante pasadores (ver apartado 4.2 de esta guía).

7.3.4 Espesor de las capas de elastómero

El espesor total de material elastómero vendrá definido por la altura de aislador necesaria para reducir los esfuerzos sobre la subestructura a los valores deseados a la vez que se controlan las deformaciones y se garantiza el cumplimiento de las comprobaciones de cortante y estabilidad (apartados 7.3.2 y 7.3.6 de esta guía).

El espesor de las capas interiores debe cumplir con los criterios mínimos definidos en el apartado 5.3.2 de UNE-EN 1337-3 y apartado 8.2.3.2 de UNE-EN 15129; todas las capas de elastómero deben tener el mismo espesor, comprendido entre 5 y 25 milímetros. El espesor ideal dependerá del módulo de elasticidad transversal G considerado: con valores de G bajos, menor tendrá que ser el espesor de la capa de material elastómero para cumplir con la comprobación de deformación tangencial frente a compresiones $\varepsilon_{c,El}$ (apartado 7.3.2.1 de esta guía), y por tanto, mayor tendrá que ser el número de placas de zunchado que delimitan cada capa de material elastómero.

Para recubrir lateralmente las placas de zunchado y de extremo, se deberá disponer una placa de material elastómero con un espesor igual o superior a $\delta = 4$ milímetros.

Comentario: un recubrimiento mayor a 4 mm presenta la ventaja de proteger al aislador frente a posibles daños durante las fases de producción, transporte e instalación. Un recubrimiento excesivo dificulta la detección de daños (abultamiento, fisuras, etc.) durante la fase de ensayos y en inspecciones pos-sísmicas. En general, un recubrimiento de 6-8 mm en aisladores de tamaño medio a grande puede ser un valor adecuado.

7.3.5 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:

$$t_s = \frac{K_p \cdot F_{z,d} \cdot (t_1 + t_2) \cdot K_h \cdot Y_m}{A_r \cdot f_y} \geq 2 \text{ mm} \quad (34)$$

donde:

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

A_r es el área efectiva reducida, según el apartado 7.2.1.1 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 aisladores elastoméricos $t_1 = t_2 = t_i$), en milímetros

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
- 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

El apartado 4.4.3 de UNE-EN 1337-3 indica, además, que las placas de zunchado deben ser de acero clase S 235 o superior, de acuerdo con la norma EN 10025, y que se deben cumplir los siguientes criterios mínimos de espesor de placa t_s :

- Espesor mínimo de las placas de zunchado: $t_s \geq 2$ mm
- Espesor de placas de extremo: según el espesor de las capas de material elastómero t_i :
 - $t_{se} \geq 15$ mm si $t_i \leq 8$ mm
 - $t_{se} \geq 18$ mm si $t_i > 8$ mm

Comentario: en general, no es aconsejable el uso de placas de 2 mm ya que pueden sufrir problemas durante su manipulación y arenado (limpieza de impurezas) en la fase de montaje del aislador. Por ello, es recomendable un espesor mínimo de 3 mm.

Si el aislador es de planta rectangular, se recomienda rematar en curva las esquinas de las placas para evitar que perforen el recubrimiento de material elastomérico cuando el aislador se vea sometido a grandes deformaciones tangenciales por desplazamientos laterales.

7.3.6 Comprobaciones de criterios de estabilidad

Se desarrollan en este apartado las comprobaciones de estabilidad asociadas a la situación sísmica, según se recoge en los apartados 8.2.3.3.4, 8.2.3.4.4 y 8.2.3.4.5 de UNE-EN 15129, y se resumen a continuación:

Los límites asociados a los criterios de estabilidad en situación no sísmica se recogen en el apartado 5.3.3.6 de UNE-EN 1337-3 y en la *Guía para el cálculo de apoyos elastoméricos* [19], y se resumen a continuación:

- Estabilidad a rotación frente a acciones no sísmicas según el apartado 5.3.3.6 de UNE-EN 1337-3.
- Estabilidad a pandeo frente a acciones no sísmicas según el apartado 5.3.3.6 de UNE-EN 1337-3.

Comentario: el criterio de estabilidad al deslizamiento de apoyos elastoméricos no anclados frente a acciones no sísmicas según el apartado 5.3.3.6 de UNE-EN 1337-3 no es de aplicación en aisladores elastoméricos, ya que estos deben anclarse siempre frente a acciones horizontales, según el apartado 8.1 de UNE-EN 15129 (ver apartados 4.2 y 7.3.7 de esta guía).

7.3.6.1 Estabilidad a pandeo o flexión lateral bajo acciones sísmicas

Se comprueba la estabilidad de los aisladores elastoméricos frente a pandeo o flexión lateral a partir de la carga crítica [15], P_{cr} , cuando el desplazamiento horizontal por cortante del aislador debido a las acciones sísmicas es nulo y el debido a acciones no sísmicas es máximo. El apartado 8.2.3.3.4 de UNE-EN 15129 proporciona la siguiente expresión para la carga crítica de pandeo, P_{cr} , cuando los aisladores presenten un factor de forma $S > 5$:

$$P_{cr} = \frac{\lambda \cdot G \cdot A_r \cdot a' \cdot S}{T_q} \quad (35)$$

donde:

- G valor nominal del módulo de elasticidad transversal (ver el apartado 7.2.3.1 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 7.2.1 de esta guía, en metros
- λ es igual a 1,3 en aisladores rectangulares y 1,1 en circulares
- A_r es el área efectiva reducida, según el apartado 7.2.1.1 de esta guía, en m²

Los aisladores elastoméricos son estables frente a pandeo o flexión lateral bajo las acciones sísmicas cuando se cumplen las limitaciones del apartado 8.2.3.4.4 de UNE-EN 15129:

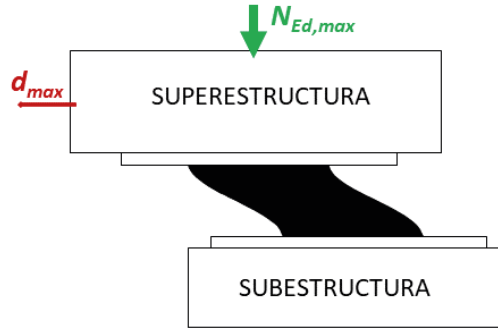


Figura 11 Esquema de inestabilidad por pandeo o flexión lateral

Según el apartado 8.2.3.4.4 de UNE-EN 15129 el aislador será estable si se cumple que:

$$N_{Ed,max} < \frac{P_{cr}}{2} \quad (36)$$

y además se debe satisfacer que:

$$\text{– Si: } N_{Ed,max} \geq \frac{P_{cr}}{4} : 1 - \frac{2N_{Ed,max}}{P_{cr}} \geq 0,7\delta \quad (37)$$

$$\text{– Si: } N_{Ed,max} < \frac{P_{cr}}{4} : \delta \leq 0,7 \quad (38)$$

donde δ es un parámetro que tiene en cuenta la deformación a cortante debida a la acción sísmica a partir del valor de cálculo de desplazamiento horizontal total máximo, d_{max} :

$$\delta = \frac{d_{Ed}}{a'} = \frac{d_{max}}{a'} \quad (39)$$

7.3.6.2 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 el caso del sistema de fijación consistente en insertar el aislador en rebajes de las placas de extremo, o los sistemas de pasadores verticales o clavijas que permiten el desplazamiento

vertical relativo entre los extremos del aislador y la superestructura y/o subestructura, en vez de los dos métodos de fijación normalizados que se ilustran en la figura 5(a) y (b) del apartado 4.2 de esta guía (apartado 8.2.3.2 de UNE-EN 15129). En tales casos, se debe verificar la estabilidad de rodamiento (vuelco) aplicando la siguiente relación:

$$d_{max} \leq \frac{1}{\gamma_R} \frac{N_{Ed,min} \cdot a'}{K_b T_b + N_{Ed,min}} \quad (40)$$

donde:

d_{max} es el desplazamiento máximo de cada aislador (igual a d_{Ed} en puentes) (ver apartado 7.3.1 de esta guía)

$N_{Ed,min}$ 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 (ver apartado 7.2.4.2 de esta guía)

T_b es la altura total del dispositivo (chapas y elastómero), en metros

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 el apartado 7.2.1 de esta guía, en metros

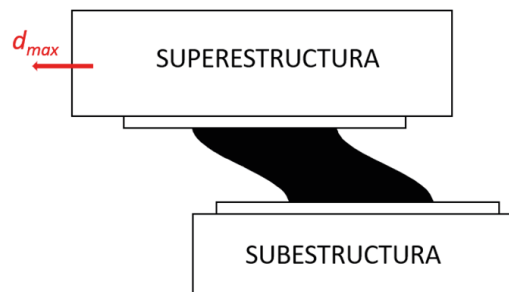


Figura 12 Esquema de inestabilidad por rodamiento

7.3.7 Dimensionamiento de uniones y anclajes

Los aisladores elastoméricos se fijan a las placas de anclaje mediante los sistemas descritos en el apartado 8.2.3.2 de UNE-EN 15129 (ver apartado 4.2 de esta guía). En el apartado 8.1 de UNE-EN 15129 se establece que todos los aisladores se deben sujetar a la estructura únicamente mediante fijaciones mecánicas con capacidad para transmitir toda la fuerza horizontal, salvo que se haya determinado mediante análisis dinámicos la carga vertical mínima que actúa sobre el aislador. En este último caso, se podrá admitir que parte de la fuerza horizontal se transmita por fricción, debiéndose disponer anclajes mecánicos que transmitan

al menos un 75 % de la fuerza horizontal. Si se utiliza algún medio de unión no mecánico (por ejemplo, masilla de epoxi), se deberá despreciar la contribución de la fricción entre el aislador elastomérico y la estructura.

Comentario: el apartado 7.6.2(4)P de UNE-EN 1998-2 añade que debe garantizarse que los anclajes son capaces de resistir las fuerzas debidas a la acción del viento. Se entiende que deben resistirse las fuerzas de la combinación no sísmica que proporcione la mayor reacción horizontal (incluyendo viento, frenado, etc.).

Adicionalmente, los anclajes deben diseñarse para que cumplan con los requisitos funcionales del apartado 4.2.3 de UNE-EN 15129 (ver apartado 6.3 de esta guía), es decir, deben proyectarse, construirse e instalarse de forma que sea posible la inspección, mantenimiento y sustitución de los aisladores elastoméricos.

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 de $\gamma_{Rd} = 1,1$ 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.

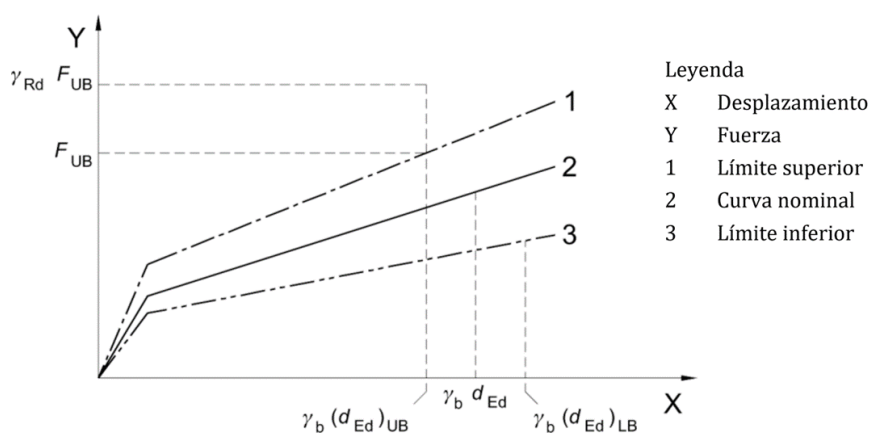


Figura 13 Diagrama esquemático de obtención de fuerza de cálculo de uniones (figura H.1 de UNE-EN 15129)

7.3.8 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 éstos alcanzan el desplazamiento horizontal máximo, d_{max} , (mayorado por el coeficiente de fiabilidad γ_s) en una determinada dirección principal, según se indica en el apartado 7.6.2(4)P de UNE-EN 1998-2. Estos efectos hay que obtenerlos por separado en cada dirección principal, y combinarlos

aplicando la regla SRSS o la regla del 30 % del apartado 4.3.3.5 de UNE-EN 1998-1. En el caso de elementos de la subestructura que no sean de cimentación, la norma permite que los efectos combinados de las acciones sísmicas calculados de esta manera se dividan por $q = 1,5$ en caso de que se haya considerado ductilidad limitada, según se explica en el apartado 7.1 de esta guía. No será así en las cimentaciones, en donde UNE-EN 1998-2 exige que el comportamiento sea esencialmente elástico, es decir, con $q = 1$.

Finalmente, los efectos combinados de las acciones sísmicas actuando en cada dirección del terremoto, se combinan con los efectos de los acciones no sísmicas en situación sísmica según indica la expresión (25), y con ello se obtienen los valores de proyecto de los efectos de las acciones que actúan en la situación sísmica. La subestructura debe dimensionarse para que la resistencia de proyecto sea mayor que dichos efectos de las acciones sísmicas.

7.3.9 Capacidad de recentrado

La capacidad de recentrado se trata en el apartado 4.5.3 y en el B.9 del anexo B de UNE-EN 15129. Entre los diferentes enfoques existentes para abordar el problema del recentrado, UNE-EN 15129 adopta el basado en consideraciones energéticas propuesto por Medeot [16], que es función de la relación entre energía almacenada, E_s , (es decir, energía de deformación elástica y energía potencial), y la energía histerética disipada, E_H . La energía disipada por un LDRB es de naturaleza viscosa (dependiente de la velocidad), no histerética, y por lo tanto E_H es nulo, por lo que la condición de recentrado de UNE-EN 15129, $E_s \geq 0,25 E_H$ (expresión 6 del apartado 4.5.3 de UNE-EN 15129), se cumple a nivel aislador elastomérico. Sin embargo, la capacidad de recentrado la debe tener la estructura con el sistema de aislamiento, no sólo los aisladores elastoméricos tratados individualmente, como se indica en el anexo B de UNE-EN 15129. Es decir, la condición $E_s \geq 0,25 E_H$ la debe cumplir la estructura completa, incluyendo el sistema de aislamiento. Eso significa que, por una parte, dentro del término E_s se deberá incluir, por ejemplo, la energía almacenada mediante deformaciones elásticas fundamentalmente de flexión de las pilas del puente. Pero por otra parte en el término E_H habrá que considerar la energía histerética disipada por la superestructura y por la subestructura debida, por ejemplo, a la fisuración de elementos de hormigón. Téngase en cuenta que, si se dimensiona la superestructura y la subestructura con un valor del factor de comportamiento q superior a 1, dentro del rango permitido en sistemas con aislamiento, $1 \leq q \leq 1,5$, se están admitiendo pequeñas deformaciones plásticas.

Comentario: como los aisladores sísmicos de bajo amortiguamiento disipan energía de tipo viscoso, y la superestructura y subestructura se mantienen esencialmente elásticos ($1 \leq q \leq 1,5$), la condición $E_s \geq 0,25 E_H$ se cumplirá en general, ya que E_H será muy pequeño o nulo.

7.3.10 Rigidez vertical mínima

El apartado 7.5.2.2 de UNE-EN 1998-2 indica que los aisladores elastoméricos que resisten cargas verticales deben ser suficientemente rígidos en la dirección vertical. Esta condición se puede considerar satisfecha si el desplazamiento horizontal del centro de gravedad de la estructura, debido a la flexibilidad vertical de los aisladores, es menor del 5 % del valor de cálculo del desplazamiento sísmico de cálculo de un aislador respecto del suelo, d_{cd} .

Comentario: en apoyos elastoméricos "sencillos" de bajo amortiguamiento según UNE-EN 1998-2, no es necesario realizar esta comprobación.

7.3.11 Predimensionamiento

Se resume a continuación una propuesta de metodología de predimensionamiento, que tiene un desarrollo más extensivo en la *Guía para el cálculo de aisladores elastoméricos de bajo amortiguamiento en zona sísmica. Ejemplo de aplicación* [22].

- Establecer el área mínima necesaria en planta para resistir la mayor reacción vertical, que probablemente será debida a la combinación no sísmica de máxima sobrecarga de uso. Para ello, se propone limitar la tensión de compresión en el aislador a 20-25 MPa, en Estado Límite Último. En la *Guía para el cálculo de apoyos elastoméricos. Ejemplo de aplicación* [20] puede encontrarse un ejemplo detallado de este predimensionamiento.
- Estimar el espesor total de elastómero necesario para resistir los cortantes sísmicos en cada aislador. Esto se puede realizar mediante un análisis simplificado de la deformación tangencial, ε_q , debida al desplazamiento sísmico de cálculo incrementado por coeficiente de mayoración por fiabilidad, $\gamma_x d_{bd}$.

Una forma sencilla de realizar este análisis es mediante el método del modo fundamental (ver apartado 7.1 de esta guía). El cortante basal obtenido mediante esta metodología puede repartirse en función de las rigideces de cada apoyo y elementos de subestructura.

Serán necesarias sucesivas iteraciones para lograr una relación adecuada entre la deformación tangencial de cálculo debida al desplazamiento sísmico, ε_q , y el espesor total de material elastómero. Hay que tener en cuenta que en el predimensionamiento es conveniente no alcanzar la deformación tangencial máxima (250 %, o 200 % si se desea considerar "acciones sísmicas pequeñas") ya que en la comprobación definitiva de la deformación tangencial debida al desplazamiento horizontal máximo (ver apartado 7.3.2.2 de esta guía), $\varepsilon_{q,max}$, hay que incluir también ciertas deformaciones no sísmicas (carga permanente, diferidas y 50 % del térmico). Pudiera suceder también que fuera necesario hacer algún ajuste en las dimensiones en planta para variar la rigidez de cierto apoyo sin modificar su espesor total.

Por otro lado, también es importante remarcar que el objetivo puede no ser la optimización del aislador, sino permitir una reducción importante de los esfuerzos sobre la subestructura, en cuyo caso, durante las iteraciones, habrá que analizar también el cortante sobre la subestructura para que, por ejemplo, los esfuerzos en combinación sísmica no superen a los de combinación no sísmica con viento, o lo hagan sólo dentro de un rango que no lleve a pilas excesivamente armadas.

- Comprobar si, añadiendo los movimientos no sísmicos de combinación sísmica obtenidos con las rigideces horizontales de los aisladores resultantes de las iteraciones anteriores, se cumple que $\varepsilon_q \leq 250\%$ (200% si se desea considerar "acciones sísmicas pequeñas"), según el apartado 7.3.2.2 de esta guía. Es conveniente comprobar también el cumplimiento de los criterios de estabilidad que se indican en el apartado 7.3.6 de esta guía.

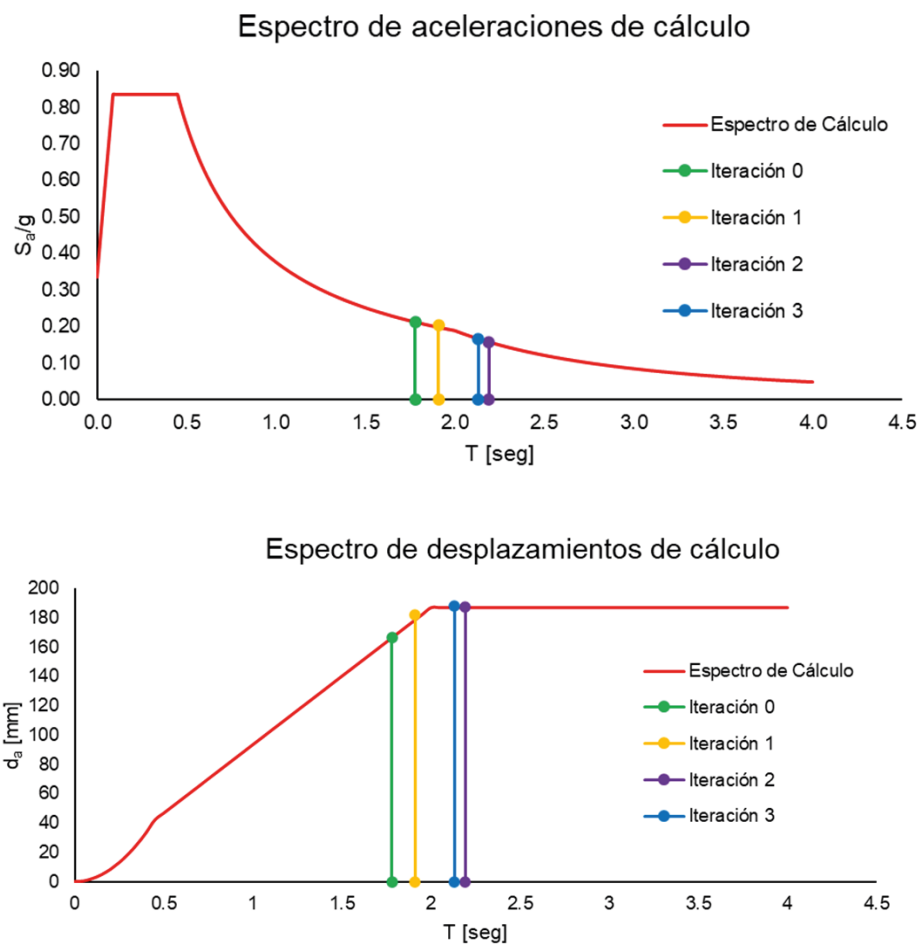


Figura 14 Ejemplo de predimensionamiento iterativo obtenido de la *Guía para el cálculo de aisladores elastoméricos de bajo amortiguamiento en zona sísmica. Ejemplo de aplicación* [21]. Aceleraciones de cálculo (superior) y en el espectro de desplazamientos de cálculo (inferior).

8

CONFORMIDAD DE LOS AISLADORES ELASTOMÉRICOS FABRICADOS

En una estructura resuelta con una estrategia sismorresistente basada en el aislamiento sísmico, los aisladores son los elementos más críticos, ya que en ellos descansa la responsabilidad de un adecuado comportamiento. En consecuencia, resulta fundamental el control de calidad en la concepción y fabricación de los aisladores elastoméricos, así como la de los propios materiales que lo componen. Es fundamental la evaluación de la conformidad de un aislador elastomérico por parte del fabricante.

En este apartado de la guía se recogen los criterios de evaluación de conformidad a realizar en aisladores elastoméricos de bajo amortiguamiento (LDBR) empleados como aisladores sísmicos para garantizar su conformidad con la norma UNE-EN 15129.

8.1 El mercado CE

En territorio europeo la garantía de que un producto cumple con la legislación europea viene dada por el marcado CE; en el caso de los aisladores elastoméricos, la posesión del marcado CE garantiza el cumplimiento de los requisitos exigidos por la norma UNE-EN 15129 y confiere al aislador una presunción de aptitud para los usos previstos en la norma.

Al tratarse de un producto incluido en una norma armonizada, los aisladores sísmicos elastoméricos deben llevar obligatoriamente el marcado CE. Las condiciones del marcado se establecen en el anexo ZA de la norma UNE-EN 15129, en donde se define:

- Cuáles son las prestaciones del aislador a controlar.
- Cómo se evalúa la conformidad de los aisladores, en lo relativo a dichas prestaciones. Para la evaluación de la conformidad de los apoyos, se definen varios "sistemas de evaluación de conformidad" que, de forma sucinta, distribuyen las tareas asociadas a cada sistema de evaluación entre fabricante y organismo notificado.

Las prestaciones del aislador elastomérico a controlar, independientes del sistema de evaluación a aplicar, se definen en las tablas ZA.1.4 y ZA.1.5 de UNE-EN 15129 pertinentes, en función de si se considera que está sometido a "acciones sísmicas pequeñas" bajo el terremoto de proyecto o no. Estas prestaciones incluyen, entre otros, los requisitos de funcionamiento para aisladores completos y de aptitud del material recogidos en los apartados 8.2 y 8.3 de esta guía.

El control de las prestaciones recogidas en las tablas 11 y 12 de esta guía (tablas ZA.1.4 y ZA.1.5 de UNE-EN 15129), debe estar basado en los procedimientos de evaluación de conformidad indicados en las tablas ZA.3.1 y ZA.3.2 de UNE-EN 15129, que dependen del sistema de evaluación de conformidad. En el caso de los aisladores elastoméricos de puentes de carretera, se deberá consultar el sistema de evaluación de conformidad en el acto delegado CE adoptado por la CE: Decisión de la Comisión 95/467/CE de 1995-10-24.

En función del sistema de evaluación aplicable a cada producto, hay ciertas tareas que deberá realizar o bien el fabricante o bien el organismo notificado (laboratorio independiente). La asignación de las tareas de evaluación de conformidad bajo los diferentes sistemas de evaluación se define en las tablas ZA.3.1 y ZA.3.2 de UNE-EN 15129.

Comentario: en general, el fabricante realizará los ensayos de control de producción en fábrica y los ensayos de tipo serán realizados por un organismo independiente (laboratorio notificado).

Tabla 11 Aisladores elastoméricos: Prestaciones a controlar para garantizar la conformidad del apoyo con el anexo ZA de UNE-EN 15129 (resumen de la tabla ZA.1.4)

Requisitos	Apartados de la norma UNE-EN 15129	Umbral	Notas
Capacidad portante axial (compresión y tracción)	8.2.1.2.6 – Capacidad en compresión bajo desplazamiento cero	Ninguno	Conforme
	8.2.1.2.7 – Capacidad de desplazamiento horizontal		
	8.2.3.4.2 – Deformación tangencial total máxima de cálculo por cortante		
	8.2.3.4.3 – Espesor de la placa de refuerzo		
	8.2.3.4.4/8.2.3.4.5 – Estabilidad de flexión lateral/rodamiento bajo acciones sísmicas		
	8.2.1.2.12 – Requisitos particulares para puentes		
Resistencia a las cargas sísmicas repetidas	8.2.1.2.5 – Dependencia de las características horizontales bajo aplicaciones de cargas cíclicas repetidas	Ninguno	Conforme

(Continuación)

Requisitos	Apartados de la norma UNE-EN 15129	Umbral	Notas
Rigidez cortante	8.2.1.2.2 – Dependencia de las características horizontales con respecto a la deformación por tangencial del elastómero por cortante	Ninguno	Valor de cálculo [kN/mm]
	8.2.1.2.3 – Dependencia de las características horizontales con respecto a la frecuencia		Conforme
	8.2.1.2.4 – Dependencia de las características horizontales con respecto a la temperatura		
	8.2.2.1.5 – Dependencia de las características horizontales bajo aplicaciones de cargas cíclicas repetidas		
Capacidad de rotación (capacidad de recentrado)	8.2.3.4.2 – Deformación tangencial total máxima de cálculo por cortante	Ninguno	Conforme
Capacidad de disipación de energía	8.2.1.2.2 – Dependencia de las características horizontales con respecto a la deformación tangencial del elastómero por cortante	Ninguno	Valor de cálculo (% de amortiguación crítica)
	8.2.1.2.3 – Dependencia de las características horizontales con respecto a la frecuencia		Conforme
	8.2.1.2.4 – Dependencia de las características horizontales con respecto a la temperatura		
Capacidad de distorsión horizontal (Flexibilidad lateral)	8.2.1.2.7 – Capacidad de desplazamiento horizontal	Ninguno	Conforme
	8.2.2.1.4 – Ensayo de adherencia frente a deformaciones tangenciales por cortante		
	8.2.3.4.1 – Deformación tangencial de cálculo por cortante		
	8.2.3.4.2 – Deformación total máxima de cálculo por cortante		
Durabilidad	8.2.1.2.9 – Efecto de envejecimiento	Ninguno	Conforme
	8.2.2.1.3.5 – Módulo de elasticidad transversal y factor de amortiguación después del envejecimiento anaeróbico acelerado		
	8.2.2.1.4.2 – Ensayo de adherencia después de envejecimiento		
	8.2.2.1.6 – Resistencia al crecimiento lento de las grietas		
	8.2.2.1.2.1 – Propiedades generales de los elastómeros		
Sustancias peligrosas	4.8 – Sustancias peligrosas	Ninguno	Se declara por referencia a la norma EN de cada producto constituyente

Tabla 12 Aisladores LDRB frente a “acciones sísmicas pequeñas”: prestaciones a controlar para garantizar la conformidad del apoyo con el anexo ZA de UNE-EN 15129 (resumen de la tabla ZA.1.5)

Requisitos	Apartados de la norma UNE-EN 15129	Umbral	Notas
Capacidad portante axial (compresión y tracción)	8.2.1.2.7 – Capacidad de desplazamiento horizontal	Ninguno	Conforme
	8.2.3.4.2 – Deformación tangencial total máxima de cálculo por cortante		
	8.2.3.4.3 – Espesor de la placa de refuerzo		
	8.2.3.4.4/8.2.3.4.5 – Estabilidad de flexión lateral/rodamiento bajo acciones sísmicas		
	8.2.1.2.12 – Requisitos particulares para puentes		
Rigidez cortante	8.2.1.2.11 (4) – Dependencia de las características horizontales con respecto a la deformación tangencial del caucho por cortante	Ninguno	Valor de cálculo [kN/mm]
	8.2.1.2.4 – Dependencia de las características horizontales con respecto a la temperatura		Conforme
	8.2.1.2.11 (3) – Módulo de elasticidad transversal según UNE-EN 1337-3		
Capacidad de rotación (capacidad de recentrado)	8.2.3.4.2 – Deformación total máxima de cálculo por cizallamiento	Ninguno	Conforme
Capacidad de distorsión horizontal (Flexibilidad lateral)	8.2.1.2.11 (6) – Capacidad de desplazamiento horizontal	Ninguno	Conforme
	8.2.3.4.1 – Deformación tangencial de cálculo por cortante		
	8.2.3.4.2 – Deformación tangencial total máxima de cálculo por cortante		
	8.2.1.2.11 (5) – Dependencia de las características horizontales con respecto a la temperatura		
Durabilidad	8.2.2.1.2.1 – Propiedades generales de los elastómeros	Ninguno	Conforme
Sustancias peligrosas	4.8 – Sustancias peligrosas	Ninguno	Se declara por referencia a la norma EN de cada producto constituyente

8.2 Aisladores elastoméricos completos

8.2.1 Requisitos a cumplir por los aisladores elastoméricos

Según el apartado 8.2.1.1 de UNE-EN 15129, los aisladores elastoméricos deben cumplir:

- Los requisitos generales especificados en el apartado 8.1 de UNE-EN 15129 (ver apartado 6 de esta guía),
- Los requisitos de funcionamiento indicados en el apartado 8.2.1.2 de UNE-EN 15129 (ver apartado 8.2.1.2 de esta guía),

Adicionalmente, el mismo apartado indica que los aisladores elastoméricos deben ser conformes con los requisitos generales y funcionales dados en los apartados 4.1 y 4.2 de UNE-EN 1337-3.

8.2.1.1 Requisitos generales

Los requisitos generales abordan criterios de proyecto y por tanto se encuentran ampliamente desarrollados en el apartado 6 de esta guía.

8.2.1.2 Requisitos de funcionamiento a verificar mediante ensayos

El apartado 8.2.1.2 de UNE-EN 15129 establece los requisitos de funcionamiento que deben garantizarse para el proyecto y fabricación de aisladores sísmicos elastoméricos. Estos requisitos exigidos definen características cuantificables de los aisladores elastoméricos que deben ser determinadas mediante ensayos de tipo (o prototipo) sobre el aislador completo. Algunos de estos ensayos (de tipo) deben ser también aplicados como ensayos de control de producción, según el apartado 8.2.4 de UNE-EN 15129.

Los ensayos de tipo y de control de producción exigidos para garantizar los requisitos de funcionamiento se describen en el apartado 8.2.2 de esta guía.

Los ensayos de respuesta horizontal se realizan en relación al desplazamiento horizontal sísmico de cálculo, d_{bd} (coeficiente de mayoración por fiabilidad aumentada, γ_x) y su correspondiente deformación tangencial, $\varepsilon_{q,E}$.

En aisladores elastoméricos LDRB, algunos requisitos se pueden justificar mediante los ensayos de tipo de materiales (ver apartado 8.3.1 de esta guía), sin necesidad de realizar los ensayos de tipo de los aisladores completos.

8.2.1.2.1 Requisitos de funcionamiento de UNE-EN 15129

Los requisitos de funcionamiento de aplicación a los aisladores sísmicos elastoméricos LDRB directamente exigidos por UNE-EN 15129 son:

- *Requisitos relativos a la dependencia de las características horizontales del aislador con respecto a la deformación tangencial del elastómero, recogidos en el apartado 8.2.1.2.2 de UNE-EN 15129:* las características horizontales de los aisladores LDRB se deben expresar en términos de rigidez horizontal efectiva, $K_{eff,b}$, y de la fracción de amortiguamiento efectiva, $\xi_{eff,b}$. Los apartados 8.2.1.2.1 y 8.2.2.1.3.1 de UNE-EN 15129 indican que en los aisladores LDRB no se requiere la medición de la amortiguación, $\xi_{eff,b}$, siendo necesario únicamente obtener la rigidez efectiva del aislador, $K_{eff,b}$. Estos valores se deben obtener por medición en ensayos para las siguientes deformaciones tangenciales: $\pm 5\%$, $\pm 10\%$, $\pm 20\%$, $\pm 50\%$, $\pm 100\%$, siempre y cuando la deformación tangencial, $\varepsilon_{q,E}$, para el desplazamiento sísmico de cálculo, d_{bd} , sea $\leq 100\%$. A destacar:
 - En caso de que $\varepsilon_{q,E}$ sea $> 100\%$, se deberán obtener adicionalmente las características horizontales para amplitudes de deformación tangencial de hasta el 250% (límite de cálculo, apartado 7.3.2.2 de esta guía), según se indique en la tabla 9 de UNE-EN 15129:
 - Si $100\% < \varepsilon_{q,E} \leq 150\%$: Se ensayará adicionalmente hasta $\pm 150\%$ o $\pm \gamma_b \gamma_x \varepsilon_{q,E}$
 - Si $150\% < \varepsilon_{q,E} \leq 200\%$: Se ensayará adicionalmente hasta $\pm 150\%$ y $\pm 200\%$
 - Si $200\% < \varepsilon_{q,E} \leq 250\%$: Se ensayará adicionalmente hasta $\pm 150\%$, $\pm 200\%$ y $\pm 250\%$
 - Se consignan los valores de $K_{eff,b}$ y $\xi_{eff,b}$ ($\xi_{eff,b}$ no necesario en aisladores LDRB) medidos en el tercer ciclo correspondiente a cada amplitud de deformación.
 - Si la deformación tangencial de cálculo, $\varepsilon_{q,E}$, no coincidiera con las amplitudes de deformación ensayadas, se determinarán las propiedades horizontales por interpolación lineal a partir de las amplitudes más próximas ensayadas.
 - Las propiedades horizontales se deben determinar para frecuencias de vibración de $0,5$ Hz o de la frecuencia del sistema de aislamiento de cálculo. Si el ensayo se hiciera con otra frecuencia, se deberá indicar dicha frecuencia y corregirse los valores horizontales obtenidos para expresarlos en base a la frecuencia de $0,5$ Hz o a la del sistema de aislamiento.
 - Los valores de propiedades horizontales $K_{eff,b}$ y $\xi_{eff,b}$ (no necesario en aisladores LDRB) obtenidos en ensayos no deben desviarse en $\pm 20\%$ respecto del valor de cálculo adoptado en proyecto.
 - El valor de $K_{eff,b}$ obtenido en ensayo correspondiente a la deformación tangencial, $\varepsilon_{q,E}$, del 5% debe ser suficiente para estimar la rigidez del aislador frente a las cargas de viento (ver apartado 7.2.3.1 de esta guía), según el apartado 8.2.1.2.2 de UNE-EN 15129.

Comentario: el módulo de elasticidad transversal, G , no sólo varía según la frecuencia de aplicación de la carga, sino también en función de la deformación tangencial a la que se encuentra sometido [17]. Cuanto mayor es la deformación tangencial menor es G . Esto da sentido al hecho de que, para acciones rápidas no sísmicas, como el frenado y el viento, pero de menor magnitud que el sismo (en un aislador condicionado por la acción sísmica) [18], se considere tradicionalmente valores de $G \approx 2 \cdot G_g$ [5], frente a $G = \alpha \cdot G_g$ ($\alpha = 1,1-1,4$) para sismo, según recomienda UNE-EN 1998-2 en su apartado 7.5.2.4(5).

- En caso de que en los ensayos de control de producción no se puedan alcanzar las amplitudes correspondientes a d_{bd} , se deberá realizar un ensayo de medición de la rigidez secante horizontal bajo carga unilateral monotónica en rampa hasta el escalón de deformación tangencial de este apartado más próximo a $\varepsilon_{q,E}$. En tal caso, este ensayo también debe incluirse entre los ensayos de tipo, intercambiándolo entre los ensayos cíclicos cuando se alcance el escalón de deformación más próximo a $\varepsilon_{q,E}$.
- En caso de que en los ensayos de control de producción no se puedan alcanzar las amplitudes correspondientes a d_{bd} , se deberá realizar un ensayo cíclico de control de producción hasta alcanzar una deformación tangencial de al menos el 20 %.
- *Requisitos relativos a la dependencia de las características horizontales con respecto a la frecuencia, recogidos en el apartado 8.2.1.2.3 de UNE-EN 15129:* se determina la influencia de la frecuencia de vibración sobre las propiedades horizontales del aislador, para una deformación tangencial del 100 %. Se realiza para frecuencias de vibración de 0,1, 0,5 y 1 Hz. Los valores de las propiedades horizontales $K_{eff,b}$ y $\xi_{eff,b}$ obtenidas para las frecuencias de 0,1 y 1 Hz no deben diferir en más de un ± 20 % respecto de los obtenidos para la frecuencia de 0,5 Hz. En el caso de aisladores LDRB no es necesario determinar $\xi_{eff,b}$. Además, el ensayo de tipo sobre el aislador completo es sustituible por el de material según el apartado 8.2.2.1.3.3 de UNE-EN 15129.
- *Requisitos relativos a la dependencia de las características horizontales con respecto a la temperatura, recogidos en el apartado 8.2.1.2.4 de UNE-EN 15129:* se determina la influencia en las propiedades horizontales de las temperaturas superior, T_U , e inferior, T_L , de servicio (T_{max} y T_{min} en UNE-EN 1991-1-5) según el emplazamiento del puente, añadiendo al menos una temperatura intermedia de 23 °C, y alcanzando deformaciones tangenciales del 100 %. Los valores de las propiedades horizontales $K_{eff,b}$ y $\xi_{eff,b}$ obtenidas para la temperatura más alta no deben diferir en más de un ± 20 % respecto de los valores a 23 °C. Los valores de las propiedades horizontales $K_{eff,b}$ y $\xi_{eff,b}$ obtenidas para la temperatura más baja no deben diferir en más de + 80 % o -20 % respecto de los valores a 23 °C. En el caso de aisladores LDRB no es necesario determinar $\xi_{eff,b}$. Además, el ensayo de tipo sobre el aislador completo es sustituible por el de material según el apartado 8.2.2.1.3.4 de UNE-EN 15129.
- *Requisitos relativos a la dependencia de las características horizontales bajo aplicaciones de cargas cíclicas repetidas, recogidos en el apartado 8.2.1.2.5 de UNE-EN 15129:*

se determina la estabilidad de las propiedades horizontales cuando el aislador se somete a múltiples ciclos de deformación, alcanzando una deformación tangencial del 100 % o la deformación tangencial de cálculo. La relación entre los valores mínimo y máximo de $K_{eff,b}$ debe ser mayor que 0,6 entre los ciclos 1 y 10, y mayor que 0,7 entre los ciclos 2 y 10. La relación entre los valores mínimo y máximo de $\xi_{eff,b}$ debe ser mayor que 0,7 entre los ciclos 2 y 10. En el caso de aisladores LDRB no es necesario determinar $\xi_{eff,b}$. Además, el ensayo de tipo sobre el aislador completo es sustituible por el de material según el apartado 8.2.2.1.3.6 de UNE-EN 15129.

- *Requisitos relativos a la capacidad en compresión bajo un deslizamiento horizontal cero, recogidos en el apartado 8.2.1.2.6 de UNE-EN 15129:* el aislador se somete a una carga vertical que se va aumentando monótonamente hasta alcanzar el valor de $1,3N_{sd,ELU}$, donde $N_{sd,ELU}$ es la máxima carga vertical de cálculo según UNE-EN 1990 y UNE-EN 1991 (igual a $N_{Ed,max}$), y se mantiene con esa carga durante tres minutos. Durante el ensayo, el aislador no debe mostrar evidencias visuales de imperfecciones de funcionamiento o roturas, entre ellas:
 - Señales de rotura de adherencia
 - Placas de refuerzo mal alineadas
 - Grietas o imperfecciones superficiales mayores de 2 mm de longitud o profundidad
 - Otras evidencias de daños según el apartado 4.3.3 de UNE-EN 1337-3
- *Requisitos relativos a la capacidad de desplazamiento horizontal, recogidos en el apartado 8.2.1.2.7 de UNE-EN 15129:* no deben aparecer señales de rotura mientras el aislador se somete a deformaciones cortantes horizontales entre su cara superior e inferior hasta alcanzar el desplazamiento mayorado, $\gamma_b d_{Ed}$ ($d_{Ed} = d_{max} = \gamma_x d_{bd} + d_G$) o la carga horizontal correspondiente a dicho desplazamiento, $\gamma_b V_{Ed}$, (lo que se alcance antes), estando sometido simultáneamente a las cargas verticales de cálculo máximas, $N_{Ed,max}$, y mínima, $N_{Ed,min}$, correspondientes a la combinación sísmica de cálculo según UNE-EN 1998. Si $N_{Ed,max}$ y $N_{Ed,min}$ no difieren en más de un 20 %, se podrá realizar un único ensayo con el valor medio. γ_b es un factor parcial para los aisladores elastoméricos de valor 1,15. d_{Ed} es el desplazamiento horizontal total máximo de cada aislador para tener en cuenta el requisito de fiabilidad aumentada (ver apartado 6.2 de esta guía). Durante el ensayo el aislador no debe mostrar evidencias visuales de imperfecciones de funcionamiento o roturas, entre ellas:
 - Señales de rotura de adherencia
 - Placas de refuerzo mal alineadas
 - Grietas o imperfecciones superficiales mayores de 2 mm de longitud o profundidad
 - Las uniones del aislador a los platos de carga de ensayo no deben mostrar señales de rotura o de deformación permanente
 - Otras evidencias de daños según el apartado 4.3.3 de UNE-EN 1337-3

- *Requisitos relativos a la rigidez a compresión, recogidos en el apartado 8.2.1.2.8 de UNE-EN 15129:* se determina la rigidez vertical mediante aplicación de una carga vertical entre $1/3N_{sd,ELS}$ y $N_{sd,ELS}$, donde $N_{sd,ELS}$ es la máxima carga vertical característica según UNE-EN 1990 y UNE-EN 1991.
- *Requisitos relativos al efecto del envejecimiento, recogidos en el apartado 8.2.1.2.9 de UNE-EN 15129:* se ensaya la variabilidad de las propiedades horizontales para deformaciones tangenciales del 100 % a lo largo de la vida útil del aislador mediante ensayos de envejecimiento acelerado. Dicho envejecimiento acelerado se consigue manteniendo el aislador a 70 °C durante 14 días en condiciones anaeróbicas y sin pérdida de los ingredientes volátiles. Las variaciones de $K_{eff,b}$ y $\xi_{eff,b}$ deben ser inferiores al 20 %. Ver el apartado F.1 del anexo F de UNE-EN 15129 para más información sobre los procesos de envejecimiento para ensayos. En el caso de aisladores LDRB no es necesario determinar $\xi_{eff,b}$.

8.2.1.2.2 Requisitos de funcionamiento para el caso particular de aisladores de bajo amortiguamiento sometidos a "acciones sísmicas pequeñas"

Los requisitos de funcionamiento de aplicación a los aisladores de bajo amortiguamiento (LDRB) que se consideren sometidos a "acciones sísmicas pequeñas", cumpliendo por lo tanto las limitaciones indicadas en el apartado 4.1 de esta guía para poder considerarlos de esa manera, no requieren un nivel de control tan exhaustivo como los LDRB que no se consideren sometidos a "acciones sísmicas pequeñas". Es por ello, que el apartado 8.2.1.2.11 de UNE-EN 15129, redefine los requisitos funcionales a cumplir en este tipo de aisladores:

- Todos los requisitos de los apartados 4.1 y 4.2 de UNE-EN 1337-3.
- La comprobación de la deformación tangencial según UNE-EN 1337-3, debida a movimientos de traslación, (apartado 5.3.3.3) se debe evaluar incluyendo el desplazamiento sísmico de cálculo d_{bd} , sin aplicar el coeficiente de mayoración por fiabilidad aumentada.
- El módulo de elasticidad transversal, G , debe cumplir con los valores y requisitos del apartado 4.3.1.1 de UNE-EN 1337-3.
- Requisitos relativos a la dependencia de las características horizontales con respecto a la deformación tangencial del elastómero, recogidos en el apartado 8.2.1.2.2 de UNE-EN 15129, con la particularidad de que la rigidez efectiva $K_{eff,b}$ podrá medirse hasta la deformación tangencial máxima definida en proyecto si $\varepsilon_{q,E} < 100$ %, sin necesidad de aplicar los criterios de ciclos de deformación definidos en el apartado 8.2.1.2.2 de UNE-EN 15129 y sin la exigencia de que las cargas horizontales por viento deban producir una tensión tangencial $\varepsilon_{q,E} \leq 5$ %. En el caso de aisladores LDRB no es necesario determinar $\xi_{eff,b}$.

Comentario: en el caso particular de que $\varepsilon_{q,E} < 100$ %, se recomienda ensayar como mínimo hasta valores de deformación tangencial de $\gamma_b \gamma_x \varepsilon_{q,E}$.

- Requisitos relativos a la dependencia de las características horizontales con respecto a la temperatura, recogidos en el apartado 8.2.1.2.4 de UNE-EN 15129, con las particularidades incluidas en el apartado 8.2.1.2.11(5).
- Requisitos relativos a la capacidad de desplazamiento horizontal, recogidos en el apartado 8.2.1.2.7 de UNE-EN 15129. Este requisito se considera automáticamente cumplido si satisfacen las siguientes condiciones:
 - La deformación debida al valor de cálculo del desplazamiento horizontal total máximo, $\gamma_b d_{Ed}$, es ≤ 200 %.
 - Resistencia de la unión a cortante a temperatura ambiente según el apartado 4.3.2.1 de UNE-EN 1337-3.
- La deformación tangencial, $\varepsilon_{q,max}$, correspondiente al desplazamiento horizontal total máximo, d_{Ed} (o d_{max}), debe ser menor que 2,0 (ver apartado 7.3.2.2 de esta guía).
- Ensayos: se deben realizar los ensayos de tipo acordes a los puntos de este apartado (ver apartado 8.2.2 de esta guía). Por otro lado, el apartado 8.2.4.1.3 de UNE-EN 15129 establece que es suficiente con la realización de los ensayos de control de producción indicados en UNE-EN 1337-3.

8.2.1.2.3 Requisitos de funcionamiento adicionales de UNE-EN 1337-3

El apartado 8.2.1.2.1 de UNE-EN 15129 establece los requisitos adicionales de funcionamiento que se deben cumplir en aisladores de bajo amortiguamiento según la norma UNE-EN 1337-3, tanto si se considera que están sometidos a "acciones sísmicas pequeñas" como si no:

- Requisito de resistencia a la carga repetida en compresión, recogido en el apartado 4.3.4 de UNE-EN 1337-3.
- Requisito de resistencia al ozono, recogido en el apartado 4.3.6 de UNE-EN 1337-3.

8.2.2 Ensayos a realizar a un aislador según UNE-EN 15129

Dada la importancia de los aisladores elastoméricos en la respuesta sísmica de las estructuras, es necesario que el fabricante realice una serie de ensayos que garanticen su conformidad con la norma UNE-EN 15129.

El apartado 8.2.4.1.1 de UNE-EN 15129 incluye algunos cuidados a tener en cuenta a la hora de realizar los ensayos:

- Los aisladores elastoméricos sometidos a ensayo se deben acondicionar a la temperatura de ensayo durante 24 horas, como mínimo.

- Los aisladores elastoméricos sometidos a ensayo que tengan un espesor total de elastómero > 250 mm se deben ensayar al menos 48 h después de terminada la operación de moldeo.
- Los ensayos se deben realizar sobre aisladores elastoméricos que no hayan sido sometidos a ninguna compresión preliminar, a menos que se tengan que suministrar después de dicha compresión. En este caso, los aisladores a ensayar se deben someter al mismo procedimiento de compresión preliminar que los aisladores de producción. Se deben aportar pruebas de que las modificaciones de los valores característicos producidas por la compresión previa son permanentes.
- El aislador elastomérico sometido a ensayo no debe haber sido sometido a ningún ensayo previo, con la excepción de que más de uno de los ensayos descritos en el apartado 8.2.4.1 de UNE-EN 15129 se puedan realizar sobre un aislador, a condición de que el orden de los ensayos sea conforme con el indicado en el apartado 8.2.4.1.4.

Los ensayos deben ser realizados a una temperatura de $(23 \pm 5) ^\circ\text{C}$, salvo que en los apartados siguientes se especifiquen otras temperaturas. Cada informe de ensayo debe incluir una declaración donde se haga constar que el ensayo se ha realizado de acuerdo con esta norma.

Para validar y dar conformidad a los aisladores según la norma UNE-EN 15129, es necesaria la realización de ensayos de dos categorías: ensayos de tipo (*Type Tests* o *TT*) y ensayos de control de producción en fábrica (*Factory Production Control Tests* o *FPCT*).

8.2.2.1 Ensayos de tipo

8.2.2.1.1 Generalidad de los ensayos de tipo

Esta categoría de ensayos permite determinar y establecer los valores representativos de las propiedades de los aisladores elastoméricos además de caracterizar su comportamiento frente a sollicitaciones sísmicas, con el propósito de validar la combinación particular de materiales empleada o el procedimiento particular de fabricación empleado.

Comentario: los ensayos de tipo permiten verificar que las propiedades del aislador que se va a fabricar son acordes a las utilizadas en el proyecto del sistema de aislamiento.

Frecuencia de muestreo (8.2.4.1.4 de UNE-EN 15129)

Cada ensayo de tipo debe realizarse, al menos, dos veces para cada tipo particular de aislador elastomérico utilizado, y se debe utilizar un aislador diferente en cada ensayo o secuencia de ensayos, según el apartado 8.2.4.1.4 de UNE-EN 15129. Si se utiliza una disposición doble de ensayo a cortante para un ensayo de tipo, solo es necesario ensayar un par de aisladores.

Comentario: la disposición de doble ensayo consiste en colocar un aislador encima de otro separados por una placa de anclaje conectada al actuador de la máquina de ensayo. De esta forma, se consigue ensayar dos aisladores a la vez. Presenta el inconveniente de que la máquina tiene que permitir esta disposición menos común y que además la capacidad de empuje de la misma tiene que ser al menos el doble del cortante de ensayo de un solo aislador, para poder repartirlo entre ambos aisladores en paralelo.

La ampliación de las gamas regula las condiciones bajo las cuales un tipo de aislador utilizado en diferentes apoyos de un puente no puede considerarse como un mismo tipo particular, y por tanto debe someterse a ensayos de tipo adicionales. El apartado 8.2.4.1.2 de UNE-EN 15129 establece que estos ensayos se realizarán si se superan los siguientes límites de ampliación de gamas:

- Aumento suficiente de $\varepsilon_{q,E}$ que necesite ensayos cíclicos adicionales de acuerdo con la tabla 12 de UNE-EN 15129.
- Aumento de más de 5 °C de la temperatura de servicio más elevada.
- Disminución de más de 3 °C de la temperatura de servicio más baja.
- Aumento de más del 30 % de la carga normal, $N_{Sd,ELU}$.
- Aumento de más del 5 % de $\gamma_b \cdot d_{Ed}$.
- Aumento de más del 10 % de $N_{Ed,máx}$.
- Disminución de $N_{Ed,min}$, en más de 0,1 $N_{Sd,ELS}$ o en una cantidad suficiente al cambiar $N_{Ed,min}$ de compresión a tracción. Un valor de compresión de $N_{Ed,min}$ se trata como positivo y un valor de tracción como negativo.

Un mismo aislador de ensayo se puede someter a varios ensayos de tipo diferentes, a condición de que se realicen en el orden siguiente (ver apartado 8.2.2.1 de esta guía para una definición más completa):

1. Rigidez a compresión (8.2.1.2.8 de UNE-EN 15129).
2. Dependencia de las características horizontales sobre la deformación tangencial, frecuencia, temperatura y aplicación de carga cíclica repetida (8.2.1.2.2, 8.2.1.2.3, 8.2.1.2.4 y 8.2.1.2.5 de UNE-EN 15129, respectivamente).
3. Capacidad en compresión bajo desplazamiento horizontal nulo (8.2.1.2.6 de UNE-EN 15129).
4. Capacidad de desplazamiento horizontal (a condición de que el aislador cumpla los requisitos de los ensayos anteriores; ver el 8.2.1.2.7 de UNE-EN 15129).

Un informe de ensayo resumido debe consignar el orden en que se hicieron los ensayos sobre el aislador y las fechas y horas de cada ensayo.

Escala de los aisladores tipo (8.2.4.1.2 de UNE-EN 15129)

Los ensayos de tipo, que requieren ser realizados sobre un aislador, deben ser a escala real.

Comentario: la norma UNE-EN 15129 sólo permite el escalado de aisladores con núcleo, tipo LRB y PPRB (apartado 8.2.4.1.2 de UNE-EN 15129), que no son objeto de esta guía. Representar fidedignamente las propiedades de un aislador a escala real es complejo. En general los prototipos escalados no logran imitar la respuesta del aislador a escala real a no ser que se modifiquen las condiciones de ensayo y escala para simular correctamente los efectos termodinámicos (AASHTO [5]). Pueden encontrarse ejemplos de escalado en literatura de referencia [7] [8].

Modificaciones respecto del aislador de proyecto (8.2.4.1.2 de UNE-EN 15129)

Es posible acreditar resultados satisfactorios de aisladores muy similares a los proyectados mediante el cumplimiento del apartado 8.2.4.1.2 de UNE-EN 15129, en donde se contemplan ligeros márgenes de variación en cuanto al tamaño de los aparatos sobre los que realizar los ensayos de tipo. En el caso de que se produzcan las siguientes modificaciones en un aislador, debe ser realizada una nueva serie de ensayos:

- Un compuesto elastomérico diferente.
- Variación en más del 10 % del factor de forma de las capas de elastómero con respecto al utilizado en el dispositivo ya ensayado.
- Aumento en más del 10 % de cualquier dimensión exterior del aislador o de la dimensión en planta de las placas de refuerzo internas.
- Disminución en más del 50 % de cualquier dimensión exterior del aislador o de la dimensión en planta de las placas de refuerzo internas.
- Utilización de un tipo de sistema de fijación diferente (atornillado, empotrado o con clavijas).
- Utilización de condiciones de moldeo diferentes.

Cualquier pequeña variación en el proyecto del aislador debe requerir la realización de los siguientes ensayos de tipo, con el objeto de proveer valores de referencia para los ensayos de control de producción en fábrica:

- Rigidez a compresión (véase el apartado 8.2.1.2.8 de UNE-EN 15129).

- Rigidez horizontal y factor de amortiguación para las dos deformaciones tangenciales indicadas en el apartado 8.2.1.2.2 de UNE-EN 15129 que estén inmediatamente antes y después de la deformación tangencial de cálculo por cortante, $\varepsilon_{q,E}$.

8.2.2.1.2 Particularidades de los ensayos de tipo

Los ensayos se muestran a continuación en el orden en el que se deben realizar para poder hacerlos sobre un mismo prototipo, según el apartado 8.2.4.1.4 de UNE-EN 15129. Si un ensayo no cumpliera con los requerimientos, todos los siguientes sobre el mismo aislador quedan invalidados. En el caso de aisladores LDRB no es necesario medir $\xi_{eff,b}$. Según se indica en la tabla ZA.3.1 y ZA.3.2 de UNE-EN 15129, los ensayos de tipo deben ser realizados por un laboratorio independiente notificado (ver apartado 8.1 de esta guía).

1. Ensayo de rigidez a compresión:

Según el del apartado 8.2.1.2.8 de UNE-EN 15129 (apartado 8.2.1.2.1 de esta guía), se determina la rigidez vertical mediante aplicación de una carga vertical entre $1/3N_{sd,ELS}$ y $N_{sd,ELS}$. No deben detectarse defectos visibles tras el ensayo.

2.1. Ensayo de características horizontales bajo deformaciones cíclicas impuestas:

Según el apartado 8.2.1.2.2 de UNE-EN 15129 (apartado 8.2.1.2.1 de esta guía), medición de $K_{eff,b}$ y $\xi_{eff,b}$ (en aisladores LDRB no es necesario medir $\xi_{eff,b}$) para deformaciones tangenciales correspondientes a d_{bd} , $\varepsilon_{q,E}$, de $\pm 5\%$ - $\pm 10\%$ - $\pm 20\%$ - $\pm 50\%$ - $\pm 100\%$, y adicionalmente $\pm 150\%$ - $\pm 200\%$ - $\pm 250\%$ cuando $\varepsilon_{q,E} > 100\%$ según criterios de la tabla 9 de UNE-EN 15129. Los resultados obtenidos deben presentar una dispersión dentro del $\pm 20\%$ de los valores de cálculo.

Comentario: se recomienda incluir un escalón intermedio de deformación tangencial correspondiente al valor exacto de $\varepsilon_{q,E}$, de tal forma que pueda facilitarse su contraste con los resultados de los ensayos de control de producción.

2.2. Ensayo de rigidez horizontal bajo aplicación de carga monótona en rampa:

Solo de aplicación cuando en los ensayos de control de producción no se puedan alcanzar las deformaciones tangenciales máximas requeridas en el ensayo de características horizontales bajo deformación cíclica. Este ensayo se intercala entre los escalones de deformación del *Ensayo de características horizontales bajo deformación cíclica*. El ensayo se debe realizar una vez alcanzado el escalón cíclico más próximo a $\varepsilon_{q,E}$, y se cargará de forma creciente monótonica hasta alcanzar el valor de dicho ciclo próximo, anotando el valor de rigidez secante obtenida para posterior contraste en los ensayos de control de producción. A continuación, se debe proseguir con los escalones superiores de deformación tangencial correspondientes a los ensayos cíclicos.

2.3. *Ensayo de variación de las características horizontales con la frecuencia:*

Según el apartado 8.2.1.2.3 de UNE-EN 15129 (apartado 8.2.1.2.1 de esta guía), medición de $K_{eff,b}$, y $\xi_{eff,b}$ (en aisladores LDRB no es necesario medir $\xi_{eff,b}$) para deformaciones por cizallamiento del 100 % con frecuencias de ciclos en ensayos de 0,1, 0,5 y 1 Hz. Los valores de $K_{eff,b}$ y $\xi_{eff,b}$ (no necesario en aisladores LDRB) obtenidas con 0,1 y 1 Hz no deben diferir en más de un ± 20 % respecto de los obtenidos con 0,5 Hz.

2.4. *Ensayo de variación de las características horizontales con la temperatura:*

Según el apartado 8.2.1.2.4 de UNE-EN 15129 (apartado 8.2.1.2.1 de esta guía), medición de $K_{eff,b}$, y $\xi_{eff,b}$ (en aisladores LDRB no es necesario medir $\xi_{eff,b}$) para deformaciones tangenciales del 100 % con temperaturas en ensayos de T_U , 23 °C y T_L . Los valores de $K_{eff,b}$ y $\xi_{eff,b}$ (no necesario en aisladores LDRB) obtenidos con T_U no deben diferir en más de un ± 20 % respecto de los obtenidos con 23 °C. Los valores obtenidos con T_L no deben diferir en más de + 80 % o -20 % respecto de los obtenidos con 23 °C.

2.5. *Ensayo de dependencia de las características horizontales con la aplicación de carga cíclica repetida:*

Según el apartado 8.2.1.2.5 de UNE-EN 15129 (apartado 8.2.1.2.1 de esta guía), medición de $K_{eff,b}$, y $\xi_{eff,b}$ (en aisladores LDRB no es necesario medir $\xi_{eff,b}$) para deformaciones tangenciales del 100 % o la deformación de cálculo tangencial (si se solicita en proyecto). La relación en los valores mínimo y máximo de $K_{eff,b}$ debe ser mayor que 0,6 entre los ciclos 1 y 10, y mayor que 0,7 entre los ciclos 2 y 10. La relación en los valores mínimo y máximo de $\xi_{eff,b}$ (no necesario en aisladores LDRB) debe ser mayor que 0,7 entre los ciclos 2 y 10.

3. *Ensayo de capacidad a compresión bajo desplazamiento horizontal nulo:*

Según el apartado 8.2.1.2.6 de UNE-EN 15129 (apartado 8.2.1.2.1 de esta guía), el aislador debe poder soportar una fuerza vertical igual a $1,3N_{sd,ELU}$, donde $N_{sd,ELU}$ es el efecto de la acción de la combinación fundamental de las acciones conformes con la UNE-EN 1990 cuando el desplazamiento horizontal aplicado sea cero. En general, será la reacción máxima en ELU debido a la combinación con sobrecarga de uso, sin concomitancias con viento, frenado o térmico, pero sí con otras sobrecargas de tipo vertical. Este requisito se debe verificar aplicando una carga vertical. No deben detectarse defectos visibles tras el ensayo.

4. *Ensayo de capacidad horizontal bajo las cargas verticales máxima y mínima:*

Según el apartado 8.2.1.2.7 de UNE-EN 15129 (apartado 8.2.1.2.1 de esta guía). Se obtiene la curva fuerza-desplazamiento hasta el desplazamiento de cálculo aumentado $\gamma_b d_{Ed}$ ($d_{Ed} = d_{max} = \gamma_x d_{bd} + d_G$), con $\gamma_b = 1,15$ y estando sometido el aislador a su vez a las cargas verticales $N_{Ed,max}$ y $N_{Ed,min}$ (o al valor medio de ambas si no difieren en más de un 20 %). La relación carga-desplazamiento debe ser monótonamente creciente hasta alcanzar el valor máximo, y no debe mostrar evidencias visuales de imperfecciones de funcionamiento o rotura.

5. *Ensayo de variación de las características horizontales por envejecimiento:*

Según los apartados 8.2.1.2.5 y 8.2.2.1.3.5 de UNE-EN 15129 (apartado 8.2.1.2.1 de esta guía), medición de $K_{eff,b}$, y $\xi_{eff,b}$ (en aisladores LDRB no es necesario medir $\xi_{eff,b}$) para deformaciones tangenciales del 100 % después de un envejecimiento a 70 °C durante 14 días en condiciones anaeróbicas y sin pérdida. La relación entre los valores mínimo y máximo de $K_{eff,b}$ debe ser mayor que 0,6 entre los ciclos 1 y 10, y mayor que 0,7 entre los ciclos 2 y 10. La relación entre los valores mínimo y máximo de $\xi_{eff,b}$ (no necesario en aisladores LDRB) debe ser mayor que 0,7 entre los ciclos 2 y 10.

Comentario: UNE-EN 15129 introduce en el orden secuencial un ensayo de fluencia bajo carga vertical entre las fases 2.5 y 3, que es exclusivo para aisladores HDRB y PPRB, y por tanto no aplica a los LDRB que se tratan en esta guía.

Caso particular de aisladores elastoméricos de bajo amortiguamiento (LDRB) que se consideren sometidos a acciones sísmicas pequeñas:

El apartado 8.2.4.1.2 de UNE-EN 15129 establece que es suficiente con la realización de los ensayos de tipo indicados en UNE-EN 1337-3, añadiendo los siguientes ensayos de UNE-EN 15129 incluidos en este apartado:

1. Ensayo de variación de las características horizontales con la temperatura.
2. Ensayo de características horizontales bajo deformación cíclica.
3. Ensayo de capacidad horizontal bajo las cargas verticales máxima y mínima.

Ensayos adicionales de UNE-EN 1337-3:

Además de los ensayos anteriores, se deberán realizar los indicados en los apartados 4.3.4 y 4.3.6 de UNE-EN 1337-3, según se exige en el apartado 8.2.1.2.1 de UNE-EN 15129:

1. Ensayo de aplicación de carga repetida en compresión (apartado 4.3.4 de UNE-EN 1337-3).
2. Ensayo de resistencia al ozono (apartado 4.3.6 de UNE-EN 1337-3).

8.2.2.2 Ensayos de control de producción en fábrica

Se trata de ensayos que debe realizar el fabricante de manera regular, junto con un sistema de control de la calidad, para asegurar que todos los aisladores fabricados que se van a disponer en la infraestructura pueden asimilarse a los justificados con los ensayos de tipo. Según

se indica en la tabla ZA.3.1 y ZA.3.2 de UNE-EN 15129, los ensayos de producción en fábrica deben ser realizados por el fabricante (ver apartado 8.1 de esta guía).

Frecuencia de muestreo (8.2.4.1.4 de UNE-EN 15129):

Para cada tipo particular de aislador, el primer aislador de producción debe ser sometido a los ensayos de control de producción en fábrica a compresión y deformación tangencial. Posteriormente, al menos el 20 % de los aisladores de producción de cada tipo, elegidos al azar, deben ser sometidos a ambos ensayos de control de producción en fábrica. Para proyectos que impliquen una estructura soportada por cuatro o menos aisladores, se deberán ensayar todos, salvo indicación particular en la especificación de proyecto.

Ensayos de control de producción en fábrica (8.2.4.1.2 de UNE-EN 15129):

Se muestran a continuación los ensayos de control de producción que se deben realizar, si bien UNE-EN 15129 no especifica un orden favorable en los que se deben desarrollar.

- *Ensayo de rigidez a compresión:* según el apartado 8.2.1.2.8 de UNE-EN 15129 (apartado 8.2.1.2.1 de esta guía). Se determina la rigidez vertical mediante aplicación de una carga vertical entre $1/3N_{sd,ELS}$ y $N_{sd,ELS}$. La rigidez obtenida puede presentar una dispersión dentro del $\pm 30\%$ del valor obtenido en el ensayo tipo. No deben detectarse defectos visibles tras el ensayo.
- *Ensayo de características horizontales bajo deformación cíclica:* según el apartado 8.2.1.2.2 (apartado 8.2.1.2.1 de esta guía) y 8.2.4.1.3 de UNE-EN 15129. Medición de $K_{eff,b}$ y $\xi_{eff,b}$ para la deformación tangencial correspondiente a d_{bd} , $\varepsilon_{q,E}$. Los resultados obtenidos deben presentar una dispersión dentro del $\pm 20\%$ del valor obtenido en el ensayo tipo.

Comentario: es previsible que se deba realizar una corrección del valor de deformación obtenido del ensayo tipo según escalones estipulados para su contraste directo con el obtenido en control de producción para la deformación de cálculo (ver procedimiento propuesto para el ensayo de carga en rampa).

- *Ensayo de rigidez horizontal bajo aplicación de carga monótona en rampa:* sólo de aplicación cuando en los ensayos de control de producción no se alcancen las deformaciones tangenciales máximas requeridas en el ensayo de características horizontales bajo deformación cíclica. Se realizará un ensayo, según el apartado 8.2.1.2.2 de UNE-EN 15129, complementario al cíclico mediante aplicación de carga monótona hasta alcanzar el valor de deformación tangencial de cálculo, $\varepsilon_{q,E}$, midiendo la rigidez secante, $K_{eff,b,CPF}$, que debe corregirse multiplicando por la relación entre el valor de la rigidez $K_{eff,b,Tipo}$ medida en el ensayo monótono de tipo y la rigidez $K_{eff,b}$ utilizada en proyecto para la deformación $\varepsilon_{q,E}$. Los resultados obtenidos deben presentar una dispersión dentro del $\pm 20\%$ del valor $K_{eff,b,CPF}$ obtenido en el ensayo tipo.

- *Ensayo de características horizontales bajo deformación cíclica a amplitudes bajas:* sólo de aplicación cuando en los ensayos de control de producción no se alcancen las deformaciones tangenciales máximas requeridas en el ensayo de características horizontales bajo deformación cíclica. Se realizará un ensayo cíclico en el que se alcance al menos el 20 % de $\varepsilon_{q,E}$, en el ensayo cíclico de tipo. Si esa amplitud no coincidiera con uno de los escalones de deformación tangencial del ensayo de tipo cíclico, se interpolarán los resultados de la misma forma que en el *Ensayo de rigidez horizontal bajo aplicación de carga monótona en rampa*, de tal forma que se obtengan valores contrastables. Los resultados obtenidos deben presentar una dispersión dentro del $\pm 20\%$ del valor obtenido en el ensayo tipo.

Caso particular de aisladores elastoméricos de bajo amortiguamiento (LDRB) que se consideran sometidos a acciones sísmicas pequeñas:

El apartado 8.2.4.1.3 de UNE-EN 15129 establece que es suficiente con la realización de los ensayos de control de producción indicados en UNE-EN 1337-3. Los métodos de ensayo y frecuencia de muestreo deben ser conformes a dicha norma, y por tanto los requerimientos de este apartado no son de aplicación.

8.2.2.3 Resumen de ensayos de tipo y de control de producción

El cumplimiento de los requisitos especificados en el apartado 8.2.1.2 de UNE-EN 15129 se demuestra con la realización de los ensayos incluidos en la tabla 13 (tabla 13 de esta guía) de la misma norma.

En el caso de aisladores de bajo amortiguamiento que se consideren sometidos a "acciones sísmicas pequeñas" (cumpliendo para ello los dos requisitos del apartado 4.1 de la guía), la norma UNE-EN 15129 solo requiere como ensayos de tipo los marcados con un asterisco en la tabla 13 de dicha norma; sobre tales aisladores se deben realizar los ensayos de tipo especificados en la norma UNE-EN 1337-3. Según el apartado 8.2.4.1.3 de UNE-EN 15129, en este caso solo es necesario realizar los ensayos de control de producción en fábrica indicados en la norma UNE-EN 1337-3. Los métodos de ensayo y la frecuencia de muestreo deben ser conformes con la misma norma.

Tabla 13 Ensayos de tipo y de control de producción en fábrica de aisladores elastoméricos (tablas 13 de UNE-EN 15129)

#	Ensayo	Requisito de funcionamiento a determinar	Requisitos del ensayo de tipo	Requisitos del ensayo de control de producción en fábrica	Apartado de UNE-EN 15129 en el que se definen el método y equipo de ensayo
1	Capacidad en compresión bajo un desplazamiento horizontal nulo	Capacidad en compresión bajo un desplazamiento horizontal nulo. Véase el apartado 8.2.12.6	Carga de $1,3 \gamma_{MEd,LR}$. Ningún defecto visible. Véase el apartado 8.2.12.6	N/A	8.2.4.15.1
2	Rigidez a compresión	Rigidez a compresión. Véase el apartado 8.2.12.8	Consiguar el valor en el informe del ensayo. Véase el apartado 8.2.12.8	Dentro de $\pm 30\%$ del valor del ensayo de tipo. Ningún defecto visible. Véase el apartado 8.2.12.8	8.2.4.15.2
3	Características horizontales $K_{eff,h}$ y $\zeta_{eff,h}$ (o K_s y Q_d) bajo deformación cíclica	Dependencia de las características horizontales con respecto a la deformación tangencial del elastómero. Véase el apartado 8.2.12.2	Consiguar en el informe del ensayo la dependencia de la deformación. En el desplazamiento de cálculo d_{Ed} se dentro del $\pm 20\%$ del valor de cálculo. Véase el apartado 8.2.12.2	Valores dentro del $\pm 20\%$ del valor requerido a la deformación tangencial de cálculo. Véase el apartado 8.2.12.2	8.2.4.15.2
4	Rigidez horizontal bajo aplicación de carga monótona en rampa (requerida si la rigidez horizontal cíclica y la amortiguación obtenida en el ensayo de control de producción en fábrica no se midió para una amplitud de deformación tangencial próxima al valor correspondiente de d_{Ed})	Dependencia de las características horizontales con respecto a la deformación tangencial del elastómero. Véase el apartado 8.2.12.2	Consiguar en el informe del ensayo el desplazamiento de cálculo. Véase el apartado 8.2.12.2	Dentro del $\pm 20\%$ del valor ajustado en el ensayo de tipo. Véase el apartado 8.2.12.2	
5	Ensayo cíclico para determinar $K_{eff,h}$ y $\zeta_{eff,h}$ (o K_s y Q_d) realizado a una de las amplitudes de deformación tangencial más bajas enumeradas en el apartado 8.2.12.2. La amplitud de la deformación tangencial debe ser al menos del 20% (requerido solo si la rigidez horizontal cíclica y la amortiguación del ensayo de control de producción no se miden a la amplitud de deformación tangencial más cercana al valor correspondiente a d_{Ed})	Dependencia de las características horizontales con respecto a la deformación tangencial del elastómero. Véase el apartado 8.2.12.2	N/A	Dentro del $\pm 20\%$ de los valores del ensayo de tipo a la deformación tangencial elegida para el ensayo. Ajustándose el valor de K_s (o K_s), si es necesario, de acuerdo con el apartado 8.2.4.13	
6	Variación de las características horizontales $K_{eff,h}$ y $\zeta_{eff,h}$ (o K_s y Q_d) con la frecuencia	Dependencia de las características horizontales con respecto a la frecuencia. Véase el apartado 8.2.12.3	Consiguar la variación en el informe del ensayo. Variación máxima $\pm 20\%$. Véase el apartado 8.2.12.3	N/A	
7	Variación de las características horizontales $K_{eff,h}$ y $\zeta_{eff,h}$ (o K_s y Q_d) con la temperatura	Dependencia de las características horizontales con respecto a la temperatura. Véase el apartado 8.2.12.4	Consiguar la variación en el informe del ensayo. Variación máxima dentro de los límites indicados en el apartado 8.2.12.4	N/A	
8	Dependencia de las características horizontales $K_{eff,h}$ y $\zeta_{eff,h}$ (o K_s y Q_d) con la aplicación de carga cíclica repetida	Dependencia de las características horizontales bajo aplicación de cargas cíclicas repetidas. Véase el apartado 8.2.12.5	Dependencia dentro de los límites especificados en el apartado 8.2.12.5	N/A	
9	Capacidad horizontal bajo las cargas verticales máxima y mínima	Capacidad de desplazamiento horizontal. Véase el apartado 8.2.12.7	Curva de fuerza-desplazamiento aumentando hasta γ_{MEd} . Ningún defecto. Véase el apartado 8.2.12.7	N/A	8.2.4.15.3
10	Variación de las características horizontales $K_{eff,h}$ y $\zeta_{eff,h}$ del aislador (o de K_s solo para los LRB fabricados utilizando elastómero de baja amortiguación) a causa del envejecimiento	Efecto del envejecimiento. Véase el apartado 8.2.12.9	Variación $\leq 20\%$	N/A	8.2.4.15.2
11	Ensayo de deformación por fluencia bajo carga vertical ^a	Efecto de la deformación por fluencia. Véase el apartado 8.2.12.10	Régimen total de deformación por fluencia $< 20\%$ entre 10^4 y 10^6 minutos. Véase el apartado 8.2.12.10.	N/A	8.2.4.15.4
12	De acuerdo con el apartado 8.2.1.21 de UNE-EN 15129: aplicación de carga repetida en compresión (solo para aisladores de puentes)	Resistencia a la carga repetida en compresión. Véase el apartado 4.3.4 de UNE-EN 1337-3	El módulo de compresión de intersección después de fatiga dinámica debe ser menor o igual al módulo de intersección antes de la fatiga dinámica $+12\%$. No se aceptan fallos: defectos de unión, grietas, etc.	N/A	-
13	De acuerdo con el apartado 8.2.1.21 de UNE-EN 15129: resistencia al ozono (solo para aisladores de puentes)	Resistencia al ozono. Véase el apartado 4.3.6 de UNE-EN 1337-3	Sin grietas en el caucho Sin grietas o fallos en las uniones en la superficie de contorno del apoyo	N/A	-

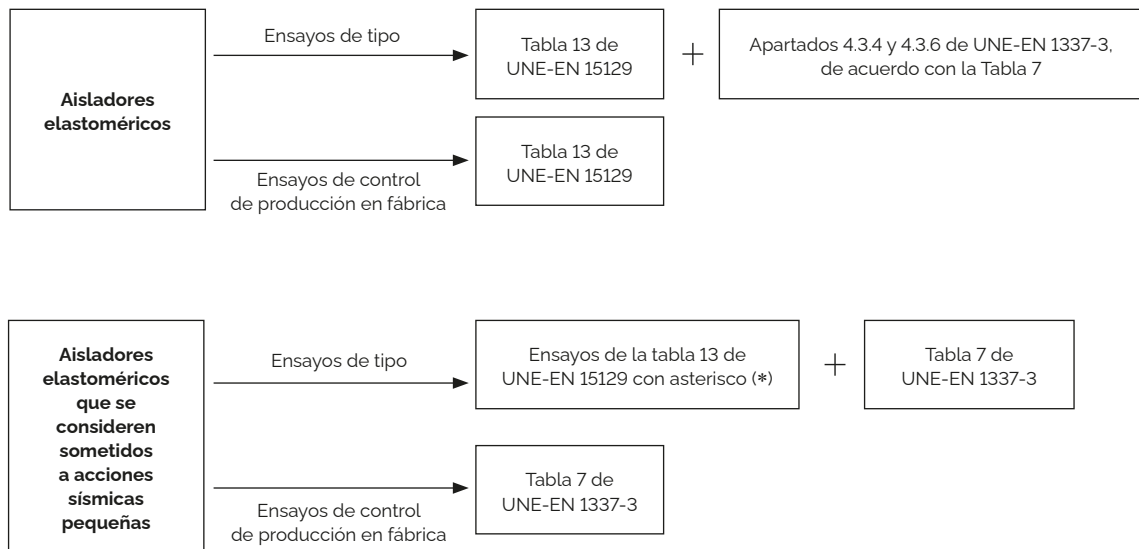
N/A = No aplicable

Para los aisladores LDRB que se consideren sometidos a "acciones sísmicas pequeñas" (cumpliendo para ello los dos requisitos del apartado 4.1 de la guía), además de los requisitos indicados en la norma UNE-EN 1337-3, se deben aplicar los ensayos de tipo marcados con un * . Para los requisitos, véase el apartado 8.2.1.2.11. En este caso solo es necesario realizar los ensayos de control de producción en fábrica indicados en la norma UNE-EN 1337-3.

Comentario: los ensayos 5 y 7 están marcados con *, por lo que en aisladores LDRB que se consideren sometidos a "acciones sísmicas pequeñas" solo se deberían realizar los ensayos de tipo correspondientes a esa fila (en los ensayos de control de producción). Sin embargo, la propia definición del ensayo indica que solo son requeridos en función de los resultados obtenidos en los ensayos de control de producción, que por tanto sí que deberían realizarse.

^a Para los compuestos que no estén basados en caucho natural (NR) o neopreno (CR), este ensayo es obligatorio. Nota editorial: el texto en azul no es parte de la tabla 13 de UNE-EN 15129, se ha añadido para facilitar la lectura y comprensión de este apartado.

Los requerimientos de ensayos de tipo y de control de producción en fábrica pueden resumirse según el siguiente esquema:



8.2.2.4 Métodos y equipo de ensayo

Los métodos y equipos de ensayo a aplicar en cada caso se definen en el apartado 8.2.4.1.5 de UNE-EN 15129. En dicho apartado se definen los requerimientos para cada tipo de ensayo: velocidad de aplicación de cargas de compresión, tiempos de mantenimiento de la carga, frecuencias de ensayos cíclicos, presiones verticales mínimas en ensayos de deformación tangencial a cortante (6 MPa salvo especificación de proyecto), condiciones de temperatura de ensayos, métodos de registro, elementos de fijación a los útiles de ensayo y contenido de los informes.

8.3 Materiales

8.3.1 Requisitos a cumplir por el material elastómero

Según el apartado 8.2.2.1.1 de UNE-EN 15129, los elastómeros brutos utilizados en la fabricación de un aislador elastomérico deben ser de material virgen, no se debe utilizar caucho vulcanizado recuperado o regenerado, y su módulo de elasticidad transversal, G , para una deformación tangencial del 100 % debe estar dentro de la gama de 0,3 y 1,5 MPa.

Los elastómeros empleados en aisladores de baja amortiguación (LDRB) deben cumplir los siguientes requisitos, especificados por la norma UNE-EN 15129:

- Propiedades generales (apartado 8.2.2.1.2 de UNE-EN 15129): deben ser conformes con los apartados 4.4.1 y 4.4.2 de UNE-EN 1337-3 y con la tabla 10 de UNE-EN 15129 (tabla 14 de esta guía). Se exceptúan los elastómeros empleados en aisladores de

baja amortiguación (LDRB) que se consideren sometidos a "acciones sísmicas pequeñas" (cumpliendo para ello los dos requisitos del apartado 4.1 de la guía). Los ensayos deben ser realizados como ensayos de tipo y como ensayos de control de producción en fábrica (véase el apartado 8.3.2 de esta guía).

- Requisitos relativos al módulo de elasticidad transversal dinámico y amortiguación (apartado 8.2.2.1.3 de UNE-EN 15129), teniendo en cuenta:
 - Efecto de la amplitud de la deformación, según el apartado 8.2.2.1.3.2 de UNE-EN 15129.
 - Efecto de la frecuencia según el apartado 8.2.2.1.3.3 de UNE-EN 15129.
 - Efecto de la temperatura según el apartado 8.2.2.1.3.4 de UNE-EN 15129.
 - Efecto del envejecimiento anaeróbico acelerado según el apartado 8.2.2.1.3.5 de UNE-EN 15129.
 - Estabilidad de las propiedades de cortante bajo la aplicación de carga cíclica repetida según el apartado 8.2.2.1.3.6 de UNE-EN 15129.
- Requisitos relativos a la adherencia a cortante (apartado 8.2.2.1.4 de UNE-EN 15129):
 - Sin envejecimiento, según el apartado 8.2.2.1.4.1 de UNE-EN 15129.
 - Después del envejecimiento, según el apartado 8.2.2.1.4.2 de UNE-EN 15129.
- Requisitos relativos a la resistencia a la cristalización a baja temperatura (apartado 8.2.2.1.5 de UNE-EN 15129).
- Requisitos relativos a la resistencia al crecimiento lento de las grietas (apartado 8.2.2.1.6 de UNE-EN 15129).

Según el apartado 8.2.2.1.3.1 de UNE-EN 15129, para los elastómeros de baja amortiguación no se requiere la medición de la amortiguación, y no se les aplican los requisitos indicados en el apartado 8.2.2.1.3 de la misma norma.

También según el apartado 8.2.2.1.1 de UNE-EN 15129, los elastómeros empleados en aisladores de baja amortiguación (LDRB) que se consideren sometidos a "acciones sísmicas pequeñas" (cumpliendo para ello los dos requisitos del apartado 4.1 de la guía) únicamente necesitan ser conformes con UNE-EN 1337-3, por lo que no están sometidos a los requisitos del apartado 8.2.2.1 de la misma.

Tabla 14 Propiedades mecánicas y físicas de los elastómeros de baja amortiguación (tabla 10 de UNE-EN 15129)

Propiedad	Requisito			Método de ensayo
	$0,3 \leq G \leq 0,7$	$0,7 < G \leq 1,1$	$1,1 < G \leq 1,5$	
Módulo de elasticidad transversal ^a (MPa)				
Resistencia a tracción mínima: (MPa):				
Probeta moldeada		16		ISO 37 Tipo 2
Probeta tomada del aislador ^b		14		
Alargamiento en la rotura mínimo (%):				
Probeta moldeada	450	425	350	"
Probeta tomada del aislador ^b	400	375	300	
Resistencia al desgarramiento mínima: ^c (kN/m)	5	8	10	ISO 34 (todas las partes) ^g Método A
Deformación permanente después de la compresión ^d 70 °C, 24h, máx.	30	30	30	ISO 815 (todas las partes) Tipo A 25 % de compresión
Resistencia al ozono ^e				
Alargamiento 30 % - 96 h 40 °C ± 2 °C	Ninguna grieta	Ninguna grieta	Ninguna grieta	ISO 1431-1
Envejecimiento acelerado en estufa de aire ^f				ISO 188, Método A
Variación máxima al valor sin envejecimiento:				
Dureza (IRHD)	-5, +8	-5, +8	-5, +8	ISO 48
Resistencia a tracción (%)	± 15	± 15	± 15	ISO 37 Tipo 2
Alargamiento en la rotura (%)	± 25	± 25	± 25	"

Dado que los ensayos de resistencia al ozono y de envejecimiento son verificaciones de que están incluidos los antioxidantes apropiados, y no ensayos relacionados con el funcionamiento de servicio, las eficacias de los mismos dependen de que se apliquen las condiciones apropiadas al elastómero utilizado en la fabricación de los dispositivos.

^a Medido con una amplitud del 100 % de la deformación tangencial a 23 °C.

^b Las probetas procedentes de aisladores acabados y completos se deben tomar de la primera capa interna y de la capa del centro del aislador.

^c Los valores son los correspondientes a un compuesto a base de caucho natural. Un compuesto a base de policloropreno debe dar valores que sean un 20 % más altos. Otros elastómeros deben cumplir los requisitos aplicables a un compuesto a base de caucho natural.

^d El valor es el correspondiente a un compuesto a base de caucho natural. Un compuesto a base de policloropreno debe dar un valor un 50 % más bajo. Para otros elastómeros, debe ser obligatorio el ensayo del apartado 8.2.1.2.10 y reemplaza al ensayo de deformación permanente después de la compresión.

^e La concentración de ozono debe ser la apropiada para el elastómero utilizado. Por ejemplo, para los vulcanizados a base de caucho natural, se debe utilizar una concentración de 25 pphm, y para los vulcanizados a base de policloropreno se debe utilizar una concentración de 100 pphm. Para los elastómeros con adherencias no saturadas carbono-carbono, no es necesario realizar ensayo de resistencia al ozono.

^f La condición de envejecimiento se debe elegir de manera que sea apropiada para los elastómeros utilizados. Por ejemplo, para vulcanizados a base de caucho natural, las condiciones deben ser 7 d a 70 °C y para vulcanizados a base de policloropreno, 3 d a 100 °C.

^g Si las patas de la probeta se amplían sin que aumente el corte inicial, el método se debe modificar para reducir dicha ampliación y asegurar que el corte aumenta, bien aumentando la anchura de las patas o bien fijando a la probeta un refuerzo flexible pero que sea relativamente inextensible; el refuerzo debe dejar un espacio libre de 5 mm donde esté previsto que se produzca el desgarro.

8.3.2 Ensayos a realizar al elastómero según UNE-EN 15129

Los ensayos a realizar al elastómero para demostrar que este satisfaga los requisitos especificados en el apartado 8.2.2.1 de UNE-EN 15129 se recogen en el apartado 8.2.4.2 de la misma norma.

Dichos ensayos deben ser realizados sobre el elastómero utilizado para fabricar la parte laminada del aislador y las probetas no deben haber sido sometidas a ninguna compresión preliminar, excepto si los aisladores se tienen que suministrar después de dicha compresión. En este caso, todas las probetas para ensayo de deformación tangencial a cortante se deben someter al mismo procedimiento de compresión preliminar que los aisladores de producción.

En su apartado 8.2.4.2.5.1, la UNE-EN 15129 incluye algunos de los requisitos generales a cumplir por las probetas a ensayar:

- Los ensayos deben ser realizados, bien sobre probetas moldeadas a la misma temperatura que la masa del dispositivo y durante un tiempo comparable, o bien sobre probetas tomadas de un dispositivo acabado y completo (no es necesario que el dispositivo esté totalmente adherido, para facilitar la preparación de las probetas). En este segundo caso, las probetas a ensayar se deben tomar de las capas internas superior e inferior de elastómero y de la mitad del dispositivo, con la excepción de que las probetas para el ensayo de resistencia al ozono se deben tomar de la capa de recubrimiento lateral.
- Salvo indicación en contra, los ensayos deben ser realizados a (23 ± 2) °C de temperatura. Cuando se realicen ensayos a temperaturas distintas de la temperatura ambiente, se deben tomar precauciones para asegurar que la totalidad de la probeta de caucho se encuentre a la temperatura requerida con una tolerancia de ± 1 °C. En el informe del ensayo se debe consignar la temperatura de la probeta.
- En el informe del ensayo se debe consignar si se utilizaron probetas moldeadas o probetas tomadas de un dispositivo acabado y completo; para este último caso, en el informe del ensayo se deben consignar los resultados obtenidos tanto con las probetas tomadas de las capas internas superior e inferior de elastómero, como de las probetas tomadas de la mitad del dispositivo.
- El informe del ensayo debe declarar que el ensayo se ha realizado de acuerdo con los requisitos de esta norma europea.

También en lo que se refiere a los materiales, los ensayos a realizar se enmarcan en dos categorías: ensayos de tipo y ensayos de control de producción en fábrica. Para determinar las características cuantificables a las que hacen referencia los requisitos de UNE-EN 15129, se deben realizar los ensayos como ensayos de tipo. Algunos de estos ensayos (de tipo o *Type Tests*) deben realizarse también en los ensayos de control de producción en fábrica (véase el apartado 8.2.4.2.3 de UNE-EN 15129).

Los métodos y equipos de ensayo a emplear se recogen en el apartado 8.2.4.2.5 de UNE-EN 15129.

8.3.2.1 Ensayos de tipo

Según el apartado 8.2.4.2.2 de UNE-EN 15129, deben realizarse los ensayos indicados en la tabla 15 de esta guía (tabla 14 de UNE-EN 15129), de acuerdo con los métodos y procedimientos especificados en el apartado 8.2.4.2.5 de la misma norma.

Adicionalmente, para elastómeros de baja amortiguación, deben realizarse como ensayos de tipo los ensayos especificados en la tabla 10 de UNE-EN 15129 (tabla 14 de esta guía) de acuerdo con el método dado en la norma especificada. Además, debe ser cumplido el requisito especificado en la tabla para cada ensayo. Los ensayos se deben realizar al menos una vez.

Para los elastómeros empleados en aisladores de baja amortiguación (LDRB) que se consideren sometidos a "acciones sísmicas pequeñas" (cumpliendo para ello los dos requisitos del apartado 4.1 de la guía), los ensayos indicados en la tabla 1 de la norma UNE-EN 1337-3 se deben realizar de acuerdo con la frecuencia de muestreo y los requisitos de las probetas indicados en la tabla 8 de dicha norma. Estos elastómeros no se someten a los requisitos de ensayo indicados en la norma UNE-EN 15129.

Tabla 15 Ensayos de tipo para elastómero (tabla 14 de UNE-EN 15129)

Ensayo	Referencia del requisito	Apartado de UNE-EN 15129 en el que se definen el método y equipo de ensayo
Variación del módulo de elasticidad transversal y del factor de amortiguación con:		
La amplitud de la deformación	8.2.2.1.3.2	8.2.4.2.5.2
La frecuencia	8.2.2.1.3.3	
La temperatura	8.2.2.1.3.4	
El envejecimiento	8.2.2.1.3.5	
La aplicación de carga cíclica repetida	8.2.2.1.3.6	
Ensayo de adherencia a cortante:		
Sin envejecimiento	8.2.2.1.4.1	8.2.4.2.5.3
Después del envejecimiento	8.2.2.1.4.2	
Cristalización a baja temperatura	8.2.2.1.5	8.2.4.2.5.4
Crecimiento lento de las grietas	8.2.2.1.6	8.2.4.2.5.5

Nota editorial: el [texto en azul](#) no es parte de la tabla 14 de UNE-EN 15129; se ha añadido para facilitar la lectura y comprensión de este apartado.

8.3.2.2 Ensayos de control de producción en fábrica

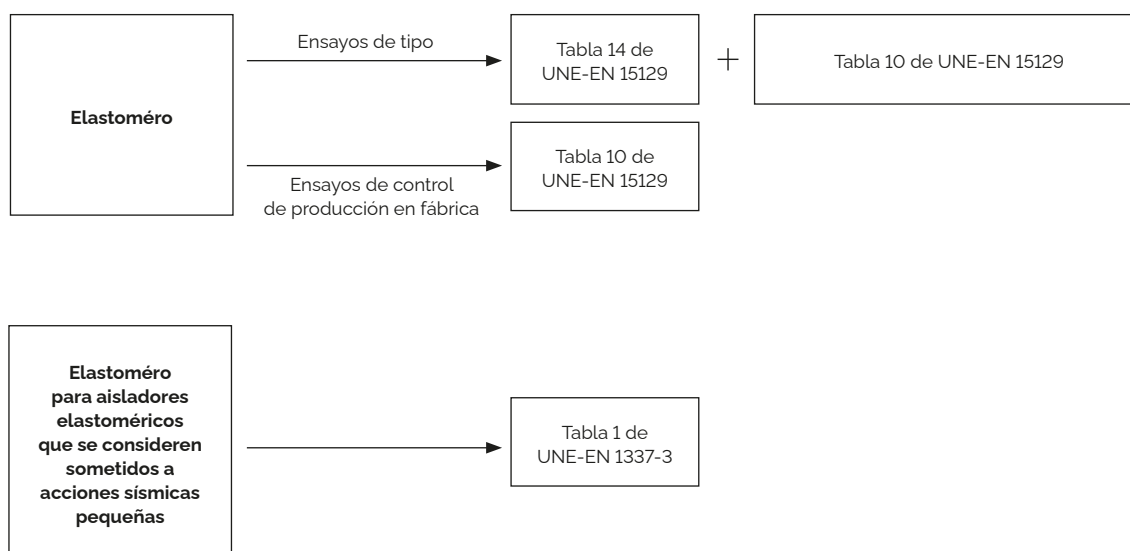
Según el apartado 8.2.4.2.3 de UNE-EN 15129, para elastómeros de baja amortiguación, los ensayos especificados en la tabla 10 deben ser realizados como ensayos de control de producción en fábrica de acuerdo con el método indicado en la norma especificada. Además, se debe cumplir el requisito especificado en la tabla para cada ensayo.

En relación con la frecuencia de ensayo, según el apartado 8.2.4.2.4 de la misma norma, los ensayos de control de fábrica deben ser realizados sobre cada lote de compuesto, con la excepción del ensayo de resistencia al desgarramiento que debe ser realizado para el primer lote compuesto y, posteriormente, mediante muestreo al azar, al menos una vez para cada cinco lotes de compuesto.

Para los elastómeros empleados en aisladores de baja amortiguación (LDRB) que se consideren sometidos a "acciones sísmicas pequeñas" (cumpliendo para ello los dos requisitos del apartado 4.1 de la guía), los ensayos indicados en la tabla 1 de la norma UNE-EN 1337-3 se deben realizar de acuerdo con la frecuencia de muestreo y los requisitos de las probetas indicados en la tabla 8 de la misma norma.

8.3.2.3 Resumen de ensayos de tipo y de control de producción

Los requerimientos de ensayos de tipo y de control de producción en fábrica pueden resumirse según el siguiente esquema:



8.3.3 Placas de zunchado de acero

Las placas de zunchado interiores y las placas de extremo que se utilizan en la fabricación de los aisladores elastoméricos deben satisfacer los requisitos indicados en el apartado 4.4.3 de UNE-EN 1337-3 (véase, además, la *Guía para el cálculo de apoyos elastoméricos* [19]).

9

EJEMPLO DE PLANO DE DEFINICIÓN DE AISLADORES ELASTOMÉRICOS A INCLUIR EN PROYECTO

Los planos de aisladores elastoméricos de un 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 ($\alpha_{b,d,max}$)

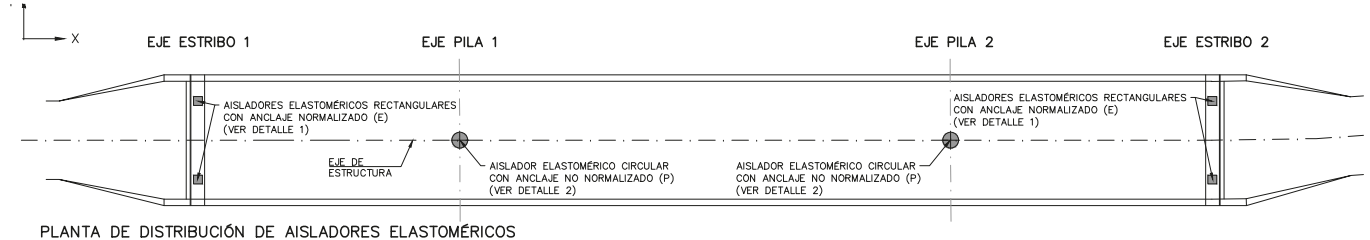
Las hipótesis de cálculo de fuerza longitudinal o transversal máxima, desplazamiento longitudinal o transversal máximo y giro transversal máximo, pueden ser concomitantes

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 (ver apartado 8.2.2 de esta guía). 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 al 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 7.3.7 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.

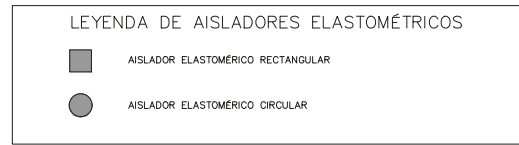
A continuación, se incluye un ejemplo de plano de aisladores a incluir en un proyecto. El ejemplo corresponde a un puente con tablero de hormigón. En caso de puente metálico, el ejemplo sería similar, pero con cuñas de nivelación en vez de meseta.

La información incluida en los ejemplos corresponde a la información mínima a incluir en los planos de apoyos de proyecto. Cada proyecto particular podrá necesitar información complementaria específica.

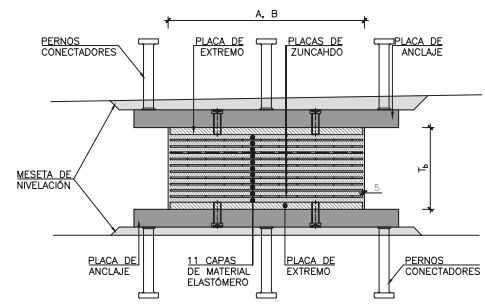


CUADRO DE DEFINICIÓN DE AISLADORES ELASTOMÉRICOS			
EJE DE APOYO	TIPO DE AISLADOR	DIMENSIONES A x B x T _b (T _e) D x T _b (T _e)	COMPOSICIÓN DEL AISLADOR
E-1	RECTANGULAR (E)	500x500x208(132)	PLACA DE EXTREMO DE ACERO DE 18 mm + 11 CAPAS DE ELASTÓMERO DE 12 mm Y 10 PLACAS DE ZUNCHADO DE ACERO DE 4 mm + PLACA DE EXTREMO DE ACERO DE 18 mm
P-1	CIRCULAR (P)	900x320(240)	PLACA DE EXTREMO DE ACERO DE 18 mm + 12 CAPAS DE ELASTÓMERO DE 20 mm Y 11 PLACAS DE ZUNCHADO DE ACERO DE 4 mm + PLACA DE EXTREMO DE ACERO DE 18 mm
P-2	CIRCULAR (P)	900x320(240)	PLACA DE EXTREMO DE ACERO DE 18 mm + 12 CAPAS DE ELASTÓMERO DE 20 mm Y 11 PLACAS DE ZUNCHADO DE ACERO DE 4 mm + PLACA DE EXTREMO DE ACERO DE 18 mm
E-2	RECTANGULAR (E)	500x500x208(132)	PLACA DE EXTREMO DE ACERO DE 18 mm + 11 CAPAS DE ELASTÓMERO DE 12 mm Y 10 PLACAS DE ZUNCHADO DE ACERO DE 4 mm + PLACA DE EXTREMO DE ACERO DE 18 mm

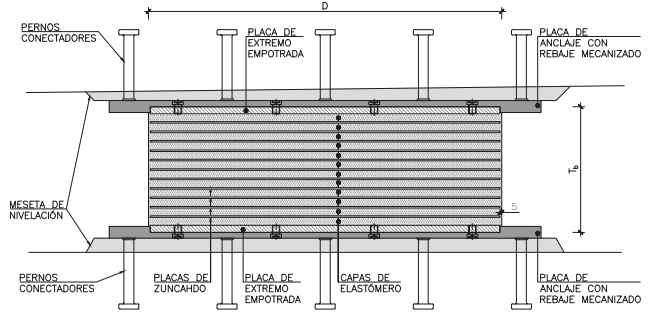
LEYENDA:
 A [mm]: DIMENSIÓN LONGITUDINAL DEL AISLADOR ELASTOMÉRICO RECTANGULAR
 B [mm]: DIMENSIÓN TRANSVERSAL DEL AISLADOR ELASTOMÉRICO RECTANGULAR
 D [mm]: DIÁMETRO DEL AISLADOR ELASTOMÉRICO CIRCULAR
 T_b [mm]: ESPESOR TOTAL DEL AISLADOR ELASTOMÉRICO
 T_e [mm]: ESPESOR NETO DE ELASTÓMERO DEL AISLADOR ELASTOMÉRICO



- NOTAS GENERALES:**
- LOS AISLADORES ELASTOMÉRICOS DEBERÁN CONTAR CON MARCADO CE Y ESTAR DISEÑADOS Y FABRICADOS CONFORME A LA NORMA UNE-EN 15129 Y UNE-EN 1337
 - TODOS LOS AISLADORES DEBEN SER SUSTITUIBLES
 - CUALQUIER CAMBIO EN LA GEOMETRÍA EN PLANTA Y ESPESOR NETO TOTAL QUE NO CUMPLA CON LAS TOLERANCIAS DE LA NORMA UNE-EN 15129, EXIGIRÁ VERIFICAR LA AFECCIÓN AL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DEL PUENTE
 - LOS VALORES ADOPTADOS PARA EL DISEÑO DE LOS AISLADORES Y DE LA SUBESTRUCTURA HAN SIDO:
 - G_{norm} = 0,9 MPa (DEFORMACIONES LENTAS)
 - G_{lim} = 1,125 MPa (FUERZAS SÍSMICAS)
 - DEFORMACIÓN TANGENCIAL, EN ELU, DEBIDO A FUERZAS Y DESPLAZAMIENTOS HORIZONTALES = 2,5 (250%)
 - AMORTIGUAMIENTO DEL AISLADOR Y DEL SISTEMA ESTRUCTURA + AISLADOR, $\zeta_{eff} = \zeta_{eff} = 5\%$
 - LOS AISLADORES SE DEBERÁN INSTALAR EN SUPERFICIES TOTALMENTE HORIZONTALES, CUMPLIENDO CON LAS TOLERANCIAS DE LA NORMA EN 1337, MEDIANTE LA EJECUCIÓN DE MESETAS DE NIVELACIÓN (VER NOTAS DE MESETAS DE NIVELACIÓN)
 - EL SISTEMA DE ANCLAJE DEFINIDO EN ESTE PLANO ES MERAMENTE ORIENTATIVO. EL SISTEMA DE ANCLAJE DE LOS APARATOS DE APOYO DEBERÁ SER DISEÑADO POR EL SUMINISTRADOR DE LOS MISMOS PARA LAS FUERZAS HORIZONTALES DEFINIDAS EN EL CUADRO DE DEFINICIÓN DE REACCIONES EN APARATOS DE APOYO Y DE FORMA QUE SE GARANTICE LA TRANSMISIÓN DE FUERZAS ENTRE TABLERO Y SUBESTRUCTURA
 - EL SISTEMA DE ANCLAJE DE LOS AISLADORES DEBERÁ GARANTIZAR LA SUSTITUCIÓN DE LOS MISMOS
 - SE DEBERÁN DEFINIR LOS REFUERZOS NECESARIOS PARA LA CORRECTA TRANSMISIÓN DE LAS FUERZAS VERTICALES Y HORIZONTALES AL TABLERO Y SUBESTRUCTURA
 - SE DEBERÁ COMPROBAR EL ARMADO LOCAL DE LAS MESETAS QUE SE VEA AFECTADO POR EL SISTEMA DE ANCLAJE PROPUESTO
 - LAS PLACAS METÁLICAS QUE QUEDEN EXPUESTAS A LA ATMÓSFERA DEBERÁN SER CONVENIENTEMENTE PROTEGIDAS (PINTURA, VULCANIZADO A ACERO INOXIDABLE, ETC.)
 - 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.

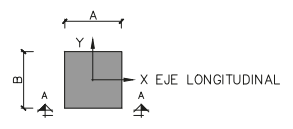


DETALLE 1: ALZADO DE AISLADOR ELASTOMÉRICO RECTANGULAR CON ANCLAJE NORMALIZADO (E)
 SIN ESCALA
 NOTA: CROQUIS ORIENTATIVO. LAS DIMENSIONES DE LOS AISLADORES SE DEFINEN EN EL CUADRO DE DEFINICIÓN DE AISLADORES ELASTOMÉRICOS

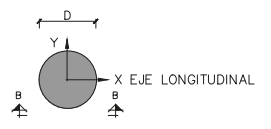


DETALLE 2: ALZADO DE AISLADOR ELASTOMÉRICO CIRCULAR CON ANCLAJE NO NORMALIZADO (P)
 SIN ESCALA
 NOTA: CROQUIS ORIENTATIVO. LAS DIMENSIONES DE LOS AISLADORES SE DEFINEN EN EL CUADRO DE DEFINICIÓN DE AISLADORES ELASTOMÉRICOS

- NOTAS PARA EL CUADRO DE DEFINICIÓN DE APOYOS:**
- EL ESPESOR BRUTO (T_b) DE LOS AISLADORES ELASTOMÉRICOS CON ANCLAJE NORMALIZADO NO TIENE EN CUENTA LAS PLACAS DE ANCLAJE DE LOS AISLADORES A LA ESTRUCTURA (VEASE EL DETALLE 1)
 - EL ESPESOR BRUTO (T_b) 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, w_h, 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

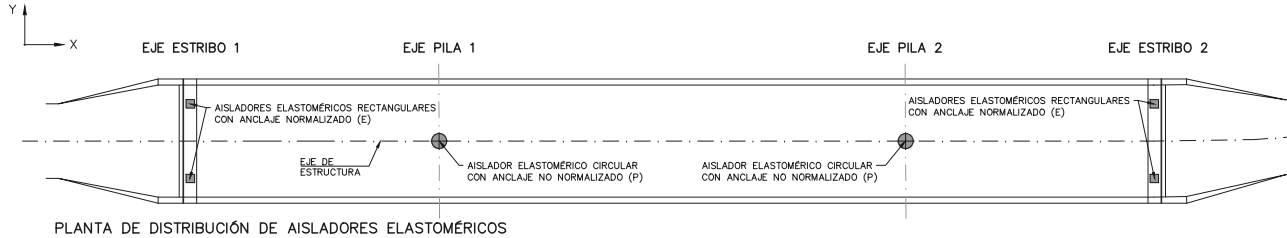


DETALLE 1 ESQUEMÁTICO EN PLANTA DE AISLADOR ELASTOMÉRICO RECTANGULAR
 SIN ESCALA

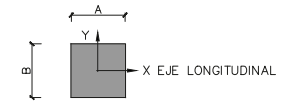


DETALLE 2 ESQUEMÁTICO EN PLANTA DE AISLADOR ELASTOMÉRICO CIRCULAR
 SIN ESCALA

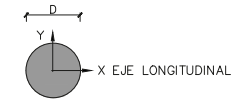
- NOTAS PARA LAS MESETAS NIVELACIÓN:**
- LAS MESETAS DE NIVELACIÓN DEBERÁN GARANTIZAR EL APOYO DE LAS PLACAS DE EXTREMO DE FORMA PLANA Y HORIZONTAL
 - TODAS LAS MESETAS SE EJECUTARÁN MEDIANTE UN GROUT DE ALTA RESISTENCIA (f_{ck,min}=50 MPa A LAS 48 H), AUTONIVELANTE Y SIN RETRACCIÓN
 - LAS MESETAS QUE SUPEREN LOS 5 CM DE ALTURA DEBERÁN SER ARMADAS
 - EL SOBRECANTO DE LAS MESETAS RESPECTO A LAS DIMENSIONES DEL AISLADOR DEBERÁ SER, COMO MÍNIMO, 1,5 VECES LA ALTURA DE ESTA



PLANTA DE DISTRIBUCIÓN DE AISLADORES ELASTOMÉRICOS



DETALLE 1 ESQUEMÁTICO EN PLANTA DE AISLADOR ELASTOMÉRICO RECTANGULAR SIN ESCALA



DETALLE 2 ESQUEMÁTICO EN PLANTA DE AISLADOR ELASTOMÉRICO CIRCULAR SIN ESCALA

CUADRO DE DEFINICIÓN DE REACCIONES NO SÍSMICAS EN AISLADORES (E)

COMBINACIÓN DE ESTADO LIMITE ÚLTIMO	$F_{x,d}$ [kN]	$F_{x,d}$ (long) [kN]	$F_{y,d}$ (transv) [kN]	$\nu_{x,d}$ (long) [mm]	$\nu_{y,d}$ (transv) [mm]	$\alpha_{x,d}$ (long) [mrad]	$\alpha_{y,d}$ (transv) [mrad]
$F_{x,d}$ máx	VALOR	VALOR	VALOR	VALOR	VALOR	VALOR	VALOR
$F_{x,d}$ mín	VALOR	VALOR	VALOR	VALOR	VALOR	VALOR	VALOR
$F_{x,d}$ máx (LONGITUDINAL)	VALOR	VALOR	VALOR	VALOR	VALOR	VALOR	VALOR
$F_{y,d}$ máx (TRANSVERSAL)	VALOR	VALOR	VALOR	VALOR	VALOR	VALOR	VALOR
$\nu_{x,d}$ máx (LONGITUDINAL)	VALOR	VALOR	VALOR	VALOR	VALOR	VALOR	VALOR
$\nu_{y,d}$ máx (TRANSVERSAL)	VALOR	VALOR	VALOR	VALOR	VALOR	VALOR	VALOR
$\alpha_{x,d}$ máx (LONGITUDINAL)	VALOR	VALOR	VALOR	VALOR	VALOR	VALOR	VALOR
$\alpha_{y,d}$ máx (TRANSVERSAL)	VALOR	VALOR	VALOR	VALOR	VALOR	VALOR	VALOR

LEYENDA DEL CUADRO DE DEFINICIÓN DE REACCIONES:

- $F_{x,d}$ [kN]: REACCIÓN VERTICAL, EN ELU
- $F_{x,d}$ [kN]: REACCIÓN HORIZONTAL LONGITUDINAL, EN ELU (FUERZAS INSTANTÁNEAS)
- $F_{y,d}$ [kN]: REACCIÓN HORIZONTAL TRANSVERSAL, EN ELU (FUERZAS INSTANTÁNEAS)
- $\nu_{x,d}$ [mm]: MOVIMIENTO IMPUESTO EN LA DIRECCIÓN LONGITUDINAL, EN ELU (DEFORMACIONES IMPUESTAS)
- $\nu_{y,d}$ [mm]: MOVIMIENTO IMPUESTO EN LA DIRECCIÓN LONGITUDINAL, EN ELU (DEFORMACIONES IMPUESTAS)
- $\alpha_{x,d}$ [mRad]: GIRO SOBRE EL EJE X (GIRO TRANSVERSAL), EN ELU
- $\alpha_{y,d}$ [mRad]: GIRO SOBRE EL EJE Y (GIRO LONGITUDINAL), EN ELU
- $N_{ed,ELS}$ [kN]: REACCIÓN VERTICAL MÁXIMA EN ELS
- $N_{ed,ELU}$ [kN]: REACCIÓN VERTICAL MÁXIMA EN ELU
- N_{ed} máx [kN]: REACCIÓN VERTICAL MÁXIMA EN COMBINACIÓN SÍSMICA
- N_{ed} mín [kN]: REACCIÓN VERTICAL MÍNIMA EN COMBINACIÓN SÍSMICA
- γ_{90} FUB [kN]: CORTANTE DE CÁLCULO DE ANCLAJES
- d_{90} [mm]: DESPLAZAMIENTO SÍSMICO HORIZONTAL DE CÁLCULO
- d_{max} [mm]: DESPLAZAMIENTO HORIZONTAL MÁXIMO DE CÁLCULO
- γ_{90} máx [mm]: DESPLAZAMIENTO MÁXIMO DE CÁLCULO AUMENTADO
- T_U [°C]: TEMPERATURA MÁXIMA EN AISLADORES
- T_L [°C]: TEMPERATURA MÍNIMA EN AISLADORES

CUADRO DE DEFINICIÓN DE REACCIONES NO SÍSMICAS EN AISLADORES (P)

COMBINACIÓN DE ESTADO LIMITE ÚLTIMO	$F_{x,d}$ [kN]	$F_{x,d}$ (long) [kN]	$F_{y,d}$ (transv) [kN]	$\nu_{x,d}$ (long) [mm]	$\nu_{y,d}$ (transv) [mm]	$\alpha_{x,d}$ (long) [mrad]	$\alpha_{y,d}$ (transv) [mrad]
$F_{x,d}$ máx	VALOR	VALOR	VALOR	VALOR	VALOR	VALOR	VALOR
$F_{x,d}$ mín	VALOR	VALOR	VALOR	VALOR	VALOR	VALOR	VALOR
$F_{x,d}$ máx (LONGITUDINAL)	VALOR	VALOR	VALOR	VALOR	VALOR	VALOR	VALOR
$F_{y,d}$ máx (TRANSVERSAL)	VALOR	VALOR	VALOR	VALOR	VALOR	VALOR	VALOR
$\nu_{x,d}$ máx (LONGITUDINAL)	VALOR	VALOR	VALOR	VALOR	VALOR	VALOR	VALOR
$\nu_{y,d}$ máx (TRANSVERSAL)	VALOR	VALOR	VALOR	VALOR	VALOR	VALOR	VALOR
$\alpha_{x,d}$ máx (LONGITUDINAL)	VALOR	VALOR	VALOR	VALOR	VALOR	VALOR	VALOR
$\alpha_{y,d}$ máx (TRANSVERSAL)	VALOR	VALOR	VALOR	VALOR	VALOR	VALOR	VALOR

CUADRO DE VALORES PARA EL ENSAYO DE LOS AISLADORES SEGÚN UNE-EN 15129

TÉRMINO	(E)	(P)
$N_{ed,ELS}$ [kN]	VALOR	VALOR
$N_{ed,ELU}$ [kN]	VALOR	VALOR
N_{ed} máx [kN]	VALOR	VALOR
N_{ed} mín [kN]	VALOR	VALOR
γ_{90} FUB [kN]	VALOR	VALOR
d_{90} [mm]	VALOR	VALOR
d_{max} [mm]	VALOR	VALOR
γ_{90} máx [mm]	VALOR	VALOR
T_U [°C]	VALOR	VALOR
T_L [°C]	VALOR	VALOR

10

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, *Laminates elastomeric bearings*, 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, ISO 22762*, 2010.
- [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.
- [12] Michael, A. S. Whittaker, D. M. Fenz and G. Apostolakis: *Seismic isolation of bridges*, 2007.

- [13] Ioanis V. Kalpakidis and Michael C. Constantinou: *Effects of heating and load history on the behavior of lead-rubber bearings*, Technical Report MCEER-08-0027. Department of Civil, Structural and Environmental Engineering, University at Buffalo, State University of New York, Buffalo, NY 14260. 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*, Vancouver, 2004.
- [17] Soong T. T., Dargush G.F.: *Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering*, 1997.
- [18] Borges J. Ferry: *Dynamic loads (in particular Wind and Earthquake loads)*. IABSE congress report, 1968.
- [19] 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.
- [20] Dirección General de Carreteras, Serie Guías Eurocódigos: *Guía para el cálculo de apoyos elastoméricos. Ejemplos de aplicación*. Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible. Secretaría General Técnica. Centro de Publicaciones, 2024.
- [21] Dirección General de Carreteras, Serie Guías Eurocódigos: *Guía para el cálculo de aisladores elastoméricos de bajo amortiguamiento en zona sísmica. Ejemplos de aplicación*. Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible. Secretaría General Técnica. Centro de Publicaciones, 2024.
- [22] Dirección General de Carreteras, Serie Guías Eurocódigos: *Guía para el proyecto sísmico de puentes de carretera*. Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. Secretaría General Técnica. Centro de Publicaciones, 2019.
- [23] Dirección General de Carreteras. *Recomendaciones para el proyecto y puesta en obra de los apoyos elastoméricos para puentes de carretera*. Segunda edición, 1982.
- [24] IGN, *Actualización de mapas de peligrosidad sísmica de España, de la web de IGME: <https://www.ign.es/web/mapas-sismicidad>, 2015*
- [25] IGME, *QAFI: Quaternary Active Faults Database of Iberia. Accessed "DATE", de la web de IGME: <https://info.igme.es/QAFI>, 2022*
- [26] Kolia B., Fardis, M. N., Pecker A.: *Designers' guide to Eurocode 8: design of bridges for earthquake resistance*. ICE, 2012.

