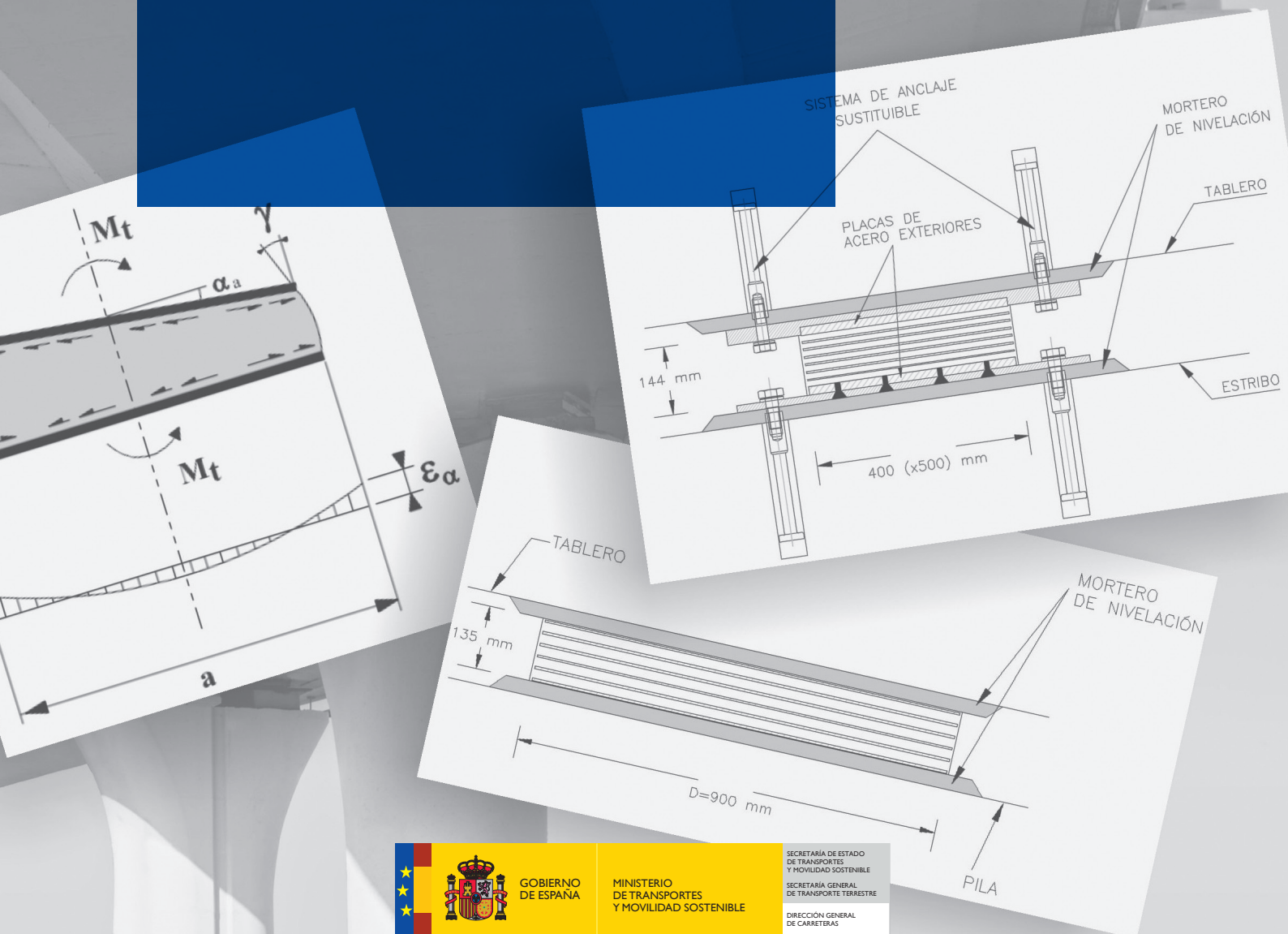


Guía para el cálculo de apoyos elastoméricos: Ejemplo de aplicación



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 apoyos elastoméricos: Ejemplo de aplicación



2024

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: 196-24-090-3

NIPO: 196-24-085-9

Depósito Legal: M-18709-2024

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 2ª 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 2028, año en que la 1ª 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 apoyos elastoméricos. Ejemplo de aplicación

De acuerdo con la Orden Circular 1/2019 de la Dirección General de Carreteras, las estructuras de la Red de Carreteras del Estado deben proyectarse con los Eurocódigos y normas asociadas, siendo la norma de referencia para el dimensionamiento de los apoyos estructurales según los Eurocódigos la norma UNE-EN 1337. En el caso particular de los apoyos elastoméricos, estos deben cumplir todos los límites de deformación y estabilidad establecidos por la parte 3 de dicha norma, aplicables a fuerzas y deformaciones impuestas en Estado Límite Último.

Con el objetivo de facilitar la aplicación de la norma UNE-EN 1337-3 al proyecto de obras de construcción en España, se han redactado dos guías: una guía teórica, la *Guía para el cálculo de apoyos elastoméricos* [6] en la que se explican en detalle las verificaciones exigidas por la norma UNE-EN 1337-3 para los apoyos elastoméricos y esta guía práctica, la *Guía para el cálculo de apoyos elastoméricos. Ejemplo de aplicación*, en la que se desarrolla un ejemplo del cálculo de apoyos elastoméricos de acuerdo con la misma norma, tomado de un proyecto real, sin tener en consideración la acción sísmica.

La verificación de apoyos elastoméricos afectados por la acción sísmica se explica con detalle en la *Guía para el cálculo de aisladores elastoméricos de bajo amortiguamiento en zona sísmica* [7] y en la *Guía para el cálculo de aisladores elastoméricos de bajo amortiguamiento en zona sísmica. Ejemplo de aplicación* [8].

En este ejemplo se han incluido diferentes tipos y geometrías de apoyos para intentar abarcar la práctica totalidad de los contenidos de la guía teórica. Para evitar la repetición de información, esta guía se refiere a la teórica cuando es necesario, por lo que ambas necesitarán ser leídas conjuntamente. A lo largo de esta guía se hace referencia a varias normas UNE EN, que corresponden a las siguientes versiones, vigentes a la fecha de redacción de este documento:

- UNE EN 1337-1:2001
- UNE-EN 1337-2:2006
- UNE-EN 1337-3:2005
- UNE-EN 15129:2019
- UNE-EN 1990:2019
- UNE-EN 1991-1-1:2019
- UNE-EN 1991-1-4:2018
- UNE-EN 1991-1-5:2018
- UNE-EN 1991-2:2019
- UNE-EN 1992-1-1:2013 y UNE-EN 1992-1-1:2013/A1:2015

Tanto la *Guía para el cálculo de apoyos elastoméricos* como esta guía práctica han sido redactadas por Miguel Ortega Cornejo y Maria João Freitas (TYLin Spain), con la participación Álvaro Serrano Corral y Guillermo Blanco Fernández (MC2 Estudio de Ingeniería), 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, ABREVIATURAS Y NORMATIVA DE CONSULTA	15
2.1. Términos y definiciones.....	15
2.2. Símbolos.....	17
2.2.1 Símbolos de UNE-EN 1337-2.....	17
2.2.1.1 Letras latinas mayúsculas.....	17
2.2.1.2 Letras latinas minúsculas.....	17
2.2.1.3 Letras griegas.....	17
2.2.2 Símbolos de UNE-EN 1337-3.....	17
2.2.2.1 Letras latinas en mayúsculas.....	17
2.2.2.2 Letras latinas en minúsculas.....	19
2.2.2.3 Letras griegas.....	20
2.2.3 Símbolos de UNE-EN 1990, UNE-EN 1991-1-4, UNE-EN 1991-1-5 y UNE-EN 1991-2.....	21
2.2.3.1 Letras latinas mayúsculas.....	21
2.2.3.2 Letras latinas minúsculas.....	21
2.2.3.3 Letras griegas.....	22
2.2.4 Símbolos adicionales.....	22
2.2.4.1 Letras latinas mayúsculas.....	22
2.2.4.2 Letras latinas minúsculas.....	23
2.2.4.3 Letras griegas.....	24
2.3. Abreviaturas.....	24
2.4. Normativas de consulta y aplicación.....	24
3 CONSIDERACIONES GENERALES Y DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA	27
3.1. Descripción de la estructura.....	27
3.2. Acciones consideradas.....	30
3.2.1 Cargas permanentes.....	31
3.2.2 Sobrecargas de uso.....	31

3.2.3	Viento.....	33
3.2.4	Efectos térmicos.....	34
3.3.	Coefficientes parciales y de combinación.....	35
3.4.	Consideraciones generales.....	36
4	PREDIMENSIONAMIENTO DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS APOYOS	37
4.1.	Predimensionamiento de apoyos en pilas.....	40
4.2.	Predimensionamiento de apoyos de estribos.....	43
5	PROCESO ITERATIVO PARA LA DETERMINACIÓN DE LAS DIMENSIONES FINALES DE LOS APOYOS	51
5.1.	1ª iteración.....	51
5.2.	2ª iteración.....	53
5.3.	3ª iteración.....	54
5.4.	Configuración final.....	55
6	REACCIONES EN ESTADO LÍMITE ÚLTIMO. SITUACIÓN PERSISTENTE	61
7	COMPROBACIÓN DE APOYOS ELASTOMÉRICOS SEGÚN UNE-EN 1337-3.....	65
7.1.	Breve resumen de las comprobaciones realizadas y criterios adoptados.....	65
7.1.1	Comprobación del límite de deformación tangencial de cálculo máxima.....	65
7.1.1.1	Deformación tangencial de cálculo debida a la carga de compresión, $\varepsilon_{c,d}$	66
7.1.1.2	Deformación tangencial de cálculo por desplazamientos horizontales, $\varepsilon_{q,d}$	67
7.1.1.3	Deformación tangencial de cálculo debida a la rotación angular, $\varepsilon_{a,d}$	68
7.1.2	Espesor mínimo de las placas de zunchado de acero.....	68
7.1.3	Comprobación de criterios de estabilidad.....	69
7.1.3.1	Comprobación de estabilidad relativa a la rotación.....	69
7.1.3.2	Comprobación de estabilidad relativa a pandeo.....	70
7.1.3.3	Comprobación de estabilidad relativa al deslizamiento.....	71
7.2.	Comprobación de los apoyos de pilas.....	72
7.2.1	Deformación tangencial de cálculo debida a la carga de compresión, $\varepsilon_{c,d}$	72
7.2.2	Deformación tangencial de cálculo por desplazamientos horizontales, $\varepsilon_{q,d}$	75
7.2.3	Deformación tangencial de cálculo debida a la rotación angular, $\varepsilon_{a,d}$	77

7.2.4	Comprobación del límite de deformación tangencial de cálculo máxima	78
7.2.5	Espesor mínimo de las placas de zunchado de acero	78
7.2.6	Comprobación de estabilidad relativa a la rotación.....	79
7.2.7	Comprobación de estabilidad relativa a pandeo	81
7.2.8	Comprobación de estabilidad relativa al deslizamiento	82
7.3.	Comprobación de los apoyos de estribos	84
7.3.1	Apoyos inferiores.....	84
7.3.1.1	Deformación tangencial de cálculo debida a la carga de compresión, $\varepsilon_{c,d}$	84
7.3.1.2	Deformación tangencial de cálculo por desplazamientos horizontales, $\varepsilon_{q,d}$	85
7.3.1.3	Deformación tangencial de cálculo debida a la rotación angular, $\varepsilon_{\alpha,d}$	86
7.3.1.4	Comprobación del límite de deformación tangencial de cálculo máxima.....	87
7.3.1.5	Espesor mínimo de las placas de zunchado de acero	88
7.3.1.6	Comprobación de estabilidad relativa a la rotación.....	88
7.3.1.7	Comprobación de estabilidad relativa a pandeo.....	91
7.3.1.8	Comprobación de estabilidad relativa al deslizamiento.....	92
7.3.2	Apoyos superiores (topes anti-levantamiento).....	92
7.3.2.1	Deformación tangencial de cálculo debida a la carga de compresión, $\varepsilon_{c,d}$	92
7.3.2.2	Deformación tangencial de cálculo por desplazamientos horizontales, $\varepsilon_{q,d}$	93
7.3.2.3	Deformación tangencial de cálculo debida a la rotación angular, $\varepsilon_{\alpha,d}$	93
7.3.2.4	Comprobación del límite de deformación tangencial de cálculo máxima.....	94
7.3.2.5	Espesor mínimo de las placas de zunchado de acero	94
7.3.2.6	Comprobación de estabilidad relativa a la rotación.....	94
7.3.2.7	Comprobación de estabilidad relativa a pandeo.....	94
7.3.2.8	Comprobación de estabilidad relativa al deslizamiento.....	95
8	EJEMPLO DE PLANO DE APOYOS A INCLUIR EN EL PROYECTO	97
9	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	101

1

INTRODUCCIÓN

1.1 Objeto y ámbito de aplicación

Con el objetivo de facilitar la aplicación de la norma UNE-EN 1337-3 al proyecto de obras de construcción en España, se han redactado dos guías: una guía teórica, la *Guía para el cálculo de apoyos elastoméricos* [6] en la que se explican en detalle las verificaciones exigidas por la norma UNE-EN 1337-3 para los apoyos elastoméricos y esta guía práctica, la *Guía para el cálculo de apoyos elastoméricos. Ejemplo de aplicación*, en la que se desarrolla un ejemplo del cálculo de varios apoyos elastoméricos de acuerdo con dicha norma, aplicado a un proyecto real.

En este ejemplo práctico se verifican los límites de deformación y estabilidad establecidos por UNE-EN 1337-3 para varios tipos y geometrías de apoyos elastoméricos, partiendo de fuerzas y deformaciones impuestas en Estado Límite Último dadas, es decir, la obtención pormenorizada de las fuerzas y desplazamientos a aplicar a los apoyos para realizar sus verificaciones no forma parte del objeto de esta guía. Las comprobaciones realizadas en este ejemplo no tienen en cuenta las acciones sísmicas. La verificación de apoyos afectados por la acción sísmica se deberá realizar según la norma UNE-EN 15129; las guías *Guía para el cálculo de aisladores elastoméricos de bajo amortiguamiento en zona sísmica* [7] y *Guía para el cálculo de aisladores elastoméricos de bajo amortiguamiento en zona sísmica. Ejemplo de aplicación* [8] explican con detalle cómo aplicarla. Esta guía, además de auxiliar al proyectista a la hora de realizar las verificaciones exigidas por UNE-EN 1337-3, tiene también como objetivo orientar a la hora de realizar una estimación previa de las dimensiones de los apoyos, y de definir la información a incluir en el plano de aparatos de apoyos elastoméricos del proyecto.

Las características de los apoyos estudiados en este ejemplo están dentro del ámbito de las normas UNE-EN 1337-1, UNE-EN 1337-2 y UNE-EN 1337-3, desde el punto de vista de su función, propiedades y características geométricas; también la estructura estudiada, en lo relativo a las temperaturas de operación, se encuentra dentro del rango de temperaturas cubierto

por UNE-EN 1337-3, entre 25 °C y +50 °C¹ y cortos periodos de hasta +70 °C. Se considera que los apoyos elastoméricos dimensionados en este ejemplo tienen el caucho natural (NR) o caucho de neopreno (CR) como polímero base.

En este documento, siempre que sea necesario, se referirá a la *Guía para el cálculo de apoyos elastoméricos* [6] para evitar la repetición de información, por lo que ambas guías necesitarán ser leídas en conjunto.

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 se limita a las obras de carretera.

1.2 Contenido de la guía

Esta guía se estructura en nueve capítulos. En los dos primeros, Introducción y términos, definiciones, símbolos, abreviaturas y normativa de consulta, se explica el objeto, ámbito y contenido del documento y, en aras de una mayor claridad del documento, se recoge también la definición de todos los símbolos y abreviaturas empleados en su redacción.

En el capítulo 3 se describe la estructura empleada en este ejemplo, las acciones actuantes consideradas y, además, se explican algunos de los criterios o consideraciones empleados o bien en la determinación de las fuerzas y desplazamientos o bien a la hora de realizar las verificaciones exigidas por UNE-EN 1337-3. Teniendo en cuenta la información recogida en el capítulo 3, se procede, en el capítulo 4, a realizar una primera estimación de las dimensiones de los apoyos.

Puesto que la distribución de fuerzas y desplazamientos horizontales depende de la rigidez de los apoyos, la obtención de las dimensiones finales de éstos implica un mínimo proceso iterativo que requiere partir de las dimensiones estimadas y termina una vez se obtienen las dimensiones finales. En el capítulo 5 se explica la evolución de las dimensiones de los apoyos desde las estimadas en el capítulo 4 hasta las dimensiones finales, así como las implicaciones de estos cambios desde el punto de vista de distribución de las fuerzas y desplazamientos horizontales. Es en este capítulo donde se define la configuración final de los apoyos a nivel de dimensiones en planta, espesores y tipo de material.

Teniendo en cuenta la configuración final de los apoyos, en el capítulo 6 se proporcionan las reacciones en Estado Límite Último (situación persistente) determinadas según los Eurocódigos de bases de cálculo y acciones, UNE-EN 1990 y UNE-EN 1991, respectivamente, para los apoyos de estribos y pilas, y correspondientes a las combinaciones de carga condicionantes para cada una de las verificaciones a realizar en el capítulo 7.

El capítulo 7, el más extenso de todos, tiene como objetivo ayudar al proyectista a la hora de realizar las verificaciones exigidas por UNE-EN 1337-3. Para evitar alargar el volumen de comprobaciones realizadas en esta guía, en este capítulo se detalla la realización de todas las

¹ UNE-EN 1337-2 excluye de su ámbito superficies deslizantes sometidas a temperaturas inferiores a -35 °C o superiores a 48 °C.

comprobaciones relativas a deformaciones y estabilidad exigidas por UNE-EN 1337-3, únicamente para la configuración final de los apoyos.

En el capítulo 8, se incluye el ejemplo de la información que debería contener el plano de apoyos elastoméricos de este proyecto, imprescindible para una adecuada selección de los apoyos por parte del fabricante. Por último, en el capítulo 9 se incluye la bibliografía empleada en la redacción de esta guía.

2

TÉRMINOS, DEFINICIONES, SÍMBOLOS, ABREVIATURAS Y NORMATIVA DE CONSULTA

2.1 Términos y definiciones

En esta guía se aplican los siguientes términos y definiciones:

- *Apoyo*: elemento utilizado para permitir la rotación entre dos componentes 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 las direcciones de un plano (apoyos libres).
- *Apoyo elastomérico*: apoyo que comprende un bloque de elastómero vulcanizado que puede ser reforzado con una o más placas de acero.
- *Apoyo elastomérico deslizante*: apoyo laminado con una lámina de PTFE en la superficie superior, que puede vulcanizarse directamente en la capa externa del elastómero o fijarse a una placa de acero, en contacto con una placa deslizante.
- *Apoyo laminado*: apoyo elastomérico reforzado internamente con una o más placas de zunchado de acero, químicamente unidas durante la vulcanización.
- *Apoyo plano sin burbujas*: apoyo elastomérico que consiste en un bloque sólido de elastómero vulcanizado sin cavidades internas.
- *Apoyo de tira*: apoyo plano sin burbujas cuya longitud es, al menos, diez veces la anchura.

- *Coefficiente de rozamiento*: relación entre la fuerza lateral (resistente) y la fuerza vertical.
- *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 parte o partes del elastómero.
- *Guía*: elemento de deslizamiento que bloquea al apoyo deslizante y le impide desplazarse a lo largo de un eje.
- *Lote*: mezcla o combinación de mezclas de elastómeros, cuando se usan para la producción de apoyos o un número de componentes idénticos producidos con el mismo ajuste de la máquina.
- *Lubricante*: grasa especial utilizada para reducir el rozamiento y el desgaste de las superficies de deslizamiento.
- *Materiales de deslizamiento*: materiales que constituyen las superficies de deslizamiento.
- *Material compuesto*: material de deslizamiento utilizado en las guías.
- *Placa deslizante*: componente que sirve de apoyo y se encuentra situado inmediatamente adyacente a la superficie deslizante superior de un apoyo. Puede ser:
 - Una pieza simple de acero austenítico.
 - Una placa delgada de acero austenítico fijada en una placa de soporte de acero dulce.
 - Una placa delgada de acero austenítico unida a una capa intermedia de material elastomérico que se vulcaniza a la placa de soporte de acero dulce.
- *Placa soporte*: componente metálico en el que se apoyan los materiales de deslizamiento.
- *Plano de deslizamiento*: superficie metálica rígida y pulida sobre la que desliza el PTFE o el material compuesto.
- *Politetrafluoroetileno (PTFE)*: material termoplástico utilizado por su bajo coeficiente de rozamiento.
- *Sistema de apoyo*: combinación de apoyos que aseguran conjuntamente los movimientos y la transmisión de fuerzas.
- *Soporte*: cualquier disposición constructiva que, incluyendo los apoyos, sirve para que un elemento estructural transmita esfuerzos y permita los movimientos tal como están provistos.

- *Superficie de cromo duro*: elemento de soporte de acero cromado duro.
- *Superficie de deslizamiento*: combinación de un par de superficies planas o curvas, de diferentes materiales, que permite desplazamientos relativos.
- *Superficie deslizante superior*: superficie de politetrafluoroetileno (PTFE) vulcanizada sobre elastómero o encastrada en una placa de respaldo de acero, en contacto con la placa deslizante que permite desplazamientos de traslación relativos.

2.2 Símbolos

Los símbolos no definidos en este apartado se pueden consultar en la *Guía para el cálculo de apoyos elastoméricos* [6].

2.2.1 Símbolos de UNE-EN 1337-2

2.2.1.1 Letras latinas mayúsculas

$R_{y,5i}$ rugosidad media de la superficie [μm]

2.2.1.2 Letras latinas minúsculas

t_p espesor de la lámina de PTFE [mm]

2.2.1.3 Letras griegas

$\mu_{\text{máx}}$ coeficiente de rozamiento

2.2.2 Símbolos de UNE-EN 1337-3

2.2.2.1 Letras latinas en mayúsculas

A área plana total del apoyo elastomérico [mm^2]

A_I área plana efectiva del apoyo laminado (área en planta común al elastómero y a las placas de zunchado), excluyendo el área de cualquier agujero si estos no son tapados posteriormente de forma efectiva. En un apoyo sin agujeros, $A_I = A'$ [mm^2]

A' área plana efectiva del apoyo laminado (área de las placas de zunchado de acero) [mm^2]

A_r área plana efectiva reducida del apoyo elastomérico calculada frente a acciones horizontales, excluyendo el área de cualquier agujero si estos no son tapados posteriormente de forma efectiva [mm^2]

D	diámetro total del apoyo laminado circular [mm]
D'	diámetro efectivo del apoyo laminado circular (diámetro de las placas de zunchado de acero) [mm]
E_b	módulo de compresibilidad volumétrica [MPa]
$F_{x,d}$	fuerza horizontal en la dirección de la dimensión a del apoyo (normalmente coincide con la dirección paralela al eje de la estructura) [kN]
$F_{y,d}$	fuerza horizontal en la dirección de la dimensión b del apoyo (normalmente coincide con la dirección perpendicular al eje de la estructura) [kN]
$F_{xy,d}$	fuerza horizontal de cálculo obtenida por suma vectorial de $F_{x,d}$ y $F_{y,d}$ [N; kN]
F_z	fuerza vertical [N; kN]
$F_{z,d}$	fuerza vertical de cálculo [N; kN]
G	valor nominal del módulo de elasticidad transversal convencional o módulo de cizalla convencional del apoyo elastomérico [MPa]
G_g	módulo de elasticidad transversal convencional o módulo de cizalla convencional del apoyo elastomérico, determinado mediante ensayo [MPa]
K_f	factor de fricción
K_h	factor para las tensiones de tracción inducidas en las placas de zunchado
K_L	factor de tipo de carga
K_p	factor de corrección de la tensión para las placas de zunchado de acero
K_r	factor de limitación de la rotación
K_s	factor de forma para la rigidez al giro en apoyos elastoméricos rectangulares
R_d	valor de cálculo de la resistencia
$R_{x,y}$	resultante de las fuerzas que resisten al movimiento de translación
S	factor de forma de las capas de material elastómero
S_d	valor de cálculo de las acciones
S_I	factor de forma para las capas más gruesas de material elastómero
T_b	espesor total del apoyo, sin incluir las placas de anclaje [mm]

- T_e espesor total de elastómero, incluyendo las capas exteriores; 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 caso de haberlas) [mm]
- T_q espesor total del material elastómero que deforma a cortante, incluyendo las capas exteriores siempre y cuando su deformación a cortante no esté restringida; 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 caso de haberlas) [mm]

2.2.2.2 Letras latinas en minúsculas

- a anchura total del apoyo elastomérico (menor dimensión del apoyo rectangular) [mm]
- a' anchura efectiva del apoyo laminado (anchura de las placas de zunchado de acero) [mm]
- b longitud total del apoyo elastomérico (mayor dimensión del apoyo rectangular) [mm]
- b' longitud efectiva del apoyo laminado (longitud de las placas de zunchado de acero) [mm]
- f_y límite elástico del acero [MPa]
- l_p perímetro libre de fuerza del apoyo elastomérico [mm]
- n número de capas de material elastómero
- t_e espesor efectivo de una capa de material elastómero en compresión [mm]
- t_i espesor de una capa de material elastómero individual en un apoyo laminado [mm]
- t_p espesor de la lámina de PTFE [mm]
- t_s espesor de la placa de zunchado de acero [mm]
- v_x desplazamiento máximo horizontal relativo en la dirección de la dimensión a del apoyo (normalmente coincide con la dirección paralela al eje de la estructura) [mm]
- $v_{x,d}$ desplazamiento máximo horizontal relativo de cálculo en la dirección de la dimensión a del apoyo (normalmente coincide con la dirección paralela al eje de la estructura) debido a todos los efectos de las cargas de ELU [mm]
- v_y desplazamiento máximo horizontal relativo en la dirección de la dimensión b del apoyo (normalmente coincide con la dirección perpendicular al eje de la estructura) [mm]

- $v_{y,d}$ desplazamiento máximo horizontal relativo de cálculo en la dirección de la dimensión b del apoyo (normalmente coincide con la dirección perpendicular al eje de la estructura) debido a todos los efectos de las cargas de ELU [mm]
- $v_{xy,d}$ desplazamiento máximo horizontal relativo de cálculo obtenido por la suma vectorial de $v_{x,d}$ y $v_{y,d}$ [mm]
- v_z movimiento/deformación vertical [mm]
- $v_{z,d}$ movimiento/deformación vertical de cálculo [mm]

2.2.2.3 Letras griegas

- α ángulo de rotación del apoyo [rad]
- $\alpha_{a,d}$ rotación angular de cálculo según un eje horizontal coincidente con la dirección en la que se mide la anchura a de un apoyo elastomérico rectangular [rad]
- $\alpha_{b,d}$ rotación angular de cálculo según un eje horizontal coincidente con la dirección en la que se mide la longitud b de un apoyo elastomérico rectangular [rad]
- α_d rotación angular de cálculo a lo largo del diámetro D de un apoyo circular [rad]
- γ_m coeficiente parcial para la resistencia del material elastómero
- $\varepsilon_{\alpha,d}$ deformación tangencial de cálculo en las capas de elastómero debido a la rotación angular
- $\varepsilon_{c,d}$ deformación tangencial de cálculo en las capas de elastómero debido a las cargas de compresión
- $\varepsilon_{q,d}$ deformación tangencial por cortante de cálculo en las capas de elastómero debido a los desplazamientos horizontales
- $\varepsilon_{t,d}$ deformación tangencial de cálculo nominal total en las capas de elastómero
- $\varepsilon_{u,k}$ valor máximo característico permitido para la deformación tangencial total en las capas de elastómero
- $\varepsilon_{u,d}$ valor máximo de cálculo permitido para la deformación tangencial total en las capas de elastómero
- μ_e coeficiente de rozamiento para el material elastómero
- σ_m tensión de compresión media [MPa]
- σ_c tensión de compresión [MPa]

2.2.3 Símbolos de UNE-EN 1990, UNE-EN 1991-1-4, UNE-EN 1991-1-5 y UNE-EN 1991-2

2.2.3.1 Letras latinas mayúsculas

F_k	valor característico de una acción [N; kN]
G_k	valor característico de una acción permanente [N; kN]
K	factor de forma empleado en la determinación de c_{prob}
Q_k	valor característico de una acción variable [N; kN]
Q_{ik}	magnitud de la carga característica por eje del sistema tándem (TS) del modelo de carga 1 (LM1) en el carril teórico i en un puente de carretera [N; kN]
Q_{lk}	magnitud de las fuerzas longitudinales características (frenado y aceleración) en puentes de carretera [N; kN]
$T_{máx}$	temperatura máxima del aire a la sombra con una probabilidad anual de ser excedida de 0,02 (50 años de periodo de retorno) [°C]
$T_{mín}$	temperatura mínima del aire a la sombra con una probabilidad anual de ser excedida de 0,02 (50 años de periodo de retorno) [°C]
$T_{máx,p}$	temperatura máxima del aire a la sombra con una probabilidad anual de ser excedida de p ($1/p$ años de periodo de retorno) [°C]
$T_{mín,p}$	temperatura mínima del aire a la sombra con una probabilidad anual de ser excedida de p ($1/p$ años de periodo de retorno) [°C]

2.2.3.2 Letras latinas minúsculas

c_{prob}	factor de probabilidad
k_1 k_2 k_3 k_4	coeficientes para calcular la temperatura máxima o mínima del aire a la sombra con una probabilidad anual de ser excedida diferente de 0,02
n	parámetro empleado en la determinación de c_{prob}
p	probabilidad anual de que sea excedida la temperatura máxima o mínima del aire a la sombra (equivalente a un periodo de retorno medio de $1/p$ años)
q_{ik}	magnitud de la carga característica distribuida (sistema UDL) del modelo de carga 1 (LM1) en el carril teórico i en un puente de carretera [N; kN]
v_b	velocidad básica del viento [m/s]

$v_{b,0}$	valor fundamental de la velocidad básica del viento [m/s]
w	anchura de calzada para un puente de carretera, incluyendo arcenes, márgenes y bandas de demarcación [m]

2.2.3.3 Letras griegas

α_Q y α_q	factores de ajuste del modelo de carga 1
$\Delta T_{N,con}$	máxima variación de contracción de la componente uniforme de temperatura de un puente [°C]
$\Delta T_{N,exp}$	máxima variación de dilatación de la componente uniforme de temperatura de un puente [°C]
$\Delta T_{M,heat}$	componente lineal de la diferencia de temperatura (calentamiento) [°C]
$\Delta T_{M,cool}$	componente lineal de la diferencia de temperatura (enfriamiento) [°C]
γ_F	coeficiente parcial de seguridad de las acciones
Ψ_0	factor de simultaneidad del valor de combinación de una acción variable
Ψ_1	factor de simultaneidad del valor frecuente de una acción variable
Ψ_2	factor de simultaneidad del valor cuasipermanente de una acción variable
ω_N	factor de reducción de la componente uniforme de temperatura para su combinación con la componente de la diferencia de temperatura
ω_M	factor de reducción de la componente de la diferencia de temperatura para su combinación con la componente uniforme de temperatura

2.2.4 Símbolos adicionales

2.2.4.1 Letras latinas mayúsculas

$F_{w,E1}$	fuerza de viento longitudinal en el eje de apoyos E1 (véase el apartado de predimensionamiento de esta guía) [N; kN]
$F_{w,E2}$	fuerza de viento longitudinal en el eje de apoyos E2 (véase el apartado de predimensionamiento de esta guía) [N; kN]
$F_{w,P1}$	fuerza de viento longitudinal en el eje de apoyos P1 (véase el apartado de predimensionamiento de esta guía) [N; kN]

$F_{wl,P2}$	fuerza de viento longitudinal en el eje de apoyos P2 (véase el apartado de predimensionamiento de esta guía) [N; kN]
$F_{wt,E1}$	fuerza de viento transversal en el eje de apoyos E1 (véase el apartado de predimensionamiento de esta guía) [N; kN]
$F_{wt,E2}$	fuerza de viento transversal en el eje de apoyos E2 (véase el apartado de predimensionamiento de esta guía) [N; kN]
$F_{wt,P1}$	fuerza de viento transversal en el eje de apoyos P1 (véase el apartado de predimensionamiento de esta guía) [N; kN]
$F_{wt,P2}$	fuerza de viento transversal en el eje de apoyos P2 (véase el apartado de predimensionamiento de esta guía) [N; kN]
$F''_{x,d}$	fuerza horizontal instantánea de cálculo en la dirección de la dimensión a del apoyo [N; kN]
$F''_{y,d}$	fuerza horizontal instantánea de cálculo en la dirección de la dimensión b del apoyo [N; kN]

2.2.4.2 Letras latinas minúsculas

k	coeficiente de rozamiento parásito por metro lineal [m^{-1}] (véase el apartado 3.2.1 de esta guía)
$q_{w,l}$	presión de viento longitudinal (véase el apartado de predimensionamiento de esta guía) [N/m; kN/m]
$q_{w,t}$	presión de viento transversal (véase el apartado de predimensionamiento de esta guía) [N/m; kN/m]
$v'_{x,d}$	desplazamiento horizontal relativo de cálculo en la dirección de la dimensión a del apoyo (normalmente coincide con la dirección paralela al eje de la estructura) debido a las deformaciones impuestas de ELU [mm]
$v''_{x,d}$	desplazamiento horizontal relativo de cálculo en la dirección de la dimensión a del apoyo (normalmente coincide con la dirección paralela al eje de la estructura) debido a las fuerzas instantáneas de ELU [mm]
$v'_{y,d}$	desplazamiento horizontal relativo de cálculo en la dirección de la dimensión b del apoyo (normalmente coincide con la dirección perpendicular al eje de la estructura) debido a las deformaciones impuestas de ELU [mm]
$v''_{y,d}$	desplazamiento horizontal relativo de cálculo en la dirección de la dimensión b del apoyo (normalmente coincide con la dirección perpendicular al eje de la estructura) debido a las fuerzas instantáneas de ELU [mm]

2.2.4.3 Letras griegas

μ coeficiente de rozamiento en curva (véase el apartado 3.2.1 de esta guía)

2.3 Abreviaturas

En esta guía se emplean las siguientes abreviaturas:

- CND: comportamiento no determinado
- CR: caucho de policloropreno
- MS: *Member State* (Estado Miembro)
- NR: caucho natural
- Pphm: partes por 100 millones en volumen
- PTFE: politetrafluoroetileno
- ELS: Estado Límite de Servicio
- ELU: Estado Límite Último
- LM1: *Load Model 1* (modelo de carga 1)
- UDL: *Uniform Distributed Loads* (cargas uniformemente distribuidas)
- TS: *Tandem System* (sistema de cargas en tándem)

2.4 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 1337-1: Reglas generales de proyecto.
- UNE-EN 1337-3: Apoyos estructurales elastoméricos.

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

- UNE-EN 1990:2002: Eurocódigos. Bases de cálculo de estructuras.
- UNE-EN 1991: Eurocódigo 1. Acciones en estructuras.
- UNE-ISO 34: Elastómeros. Caucho, vulcanizado o termoplástico. Determinación de la resistencia al desgarro.
- UNE-ISO 37: Elastómeros. Caucho, vulcanizados o termoplásticos. Determinación de las propiedades de esfuerzo-deformación en tracción.

- 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-EN 10025: Productos laminados en caliente de aceros para estructuras.

3

CONSIDERACIONES GENERALES Y DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA

3.1 Descripción de la estructura

Esta guía pretende ayudar al proyectista a la hora de realizar las comprobaciones exigidas por la norma UNE-EN 1337-3 para los apoyos elastoméricos. Para ello, se ha elegido un ejemplo bastante representativo dentro de los puentes de carretera ejecutados en España: un puente de tres vanos con tablero apoyado sobre apoyos elastoméricos.

La estructura que servirá de ejemplo para la obtención de las reacciones en los apoyos es un paso superior tipo losa de hormigón postesada, sin esviaje y de directriz recta, con una distribución de luces de 20 + 37,5 + 20 metros, ubicado en Murcia.

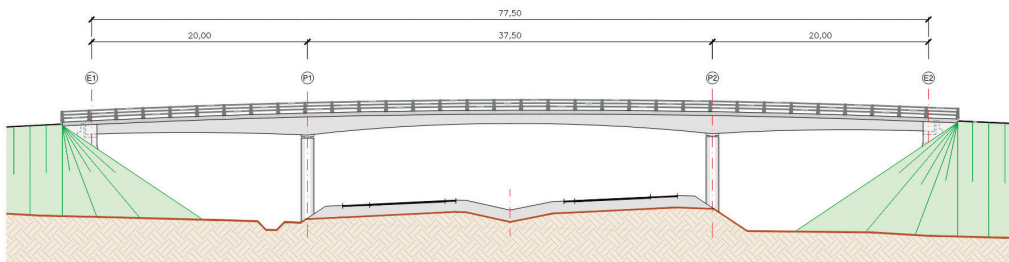


Figura 1 Alzado longitudinal

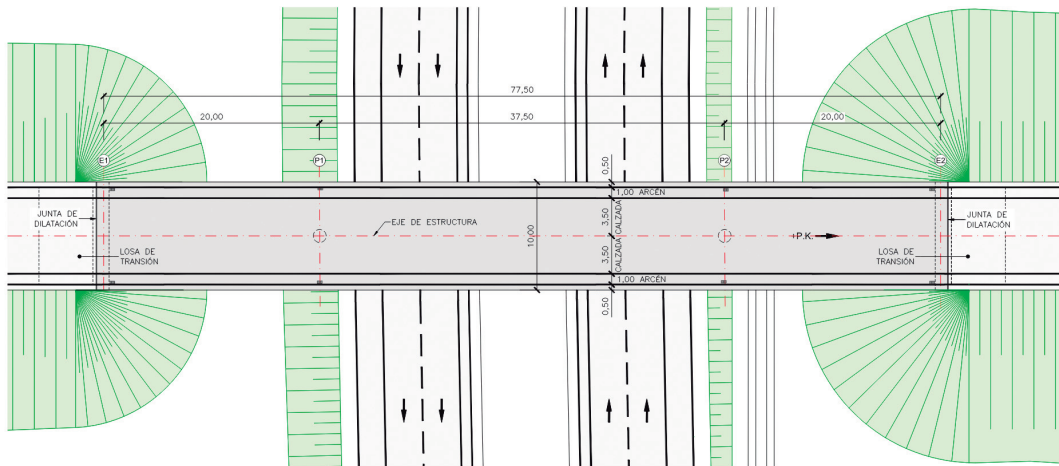


Figura 2 Planta

El tablero, de hormigón C40/50, tiene 10 metros de ancho total repartidos en dos carriles de 3,50 metros, arcenes de 1,00 metro y barreras de seguridad de 0,50 metros a cada lado. El canto del tablero es variable entre 0,90 metros en centro de vano y estribos y 1,70 metros sobre pilas.

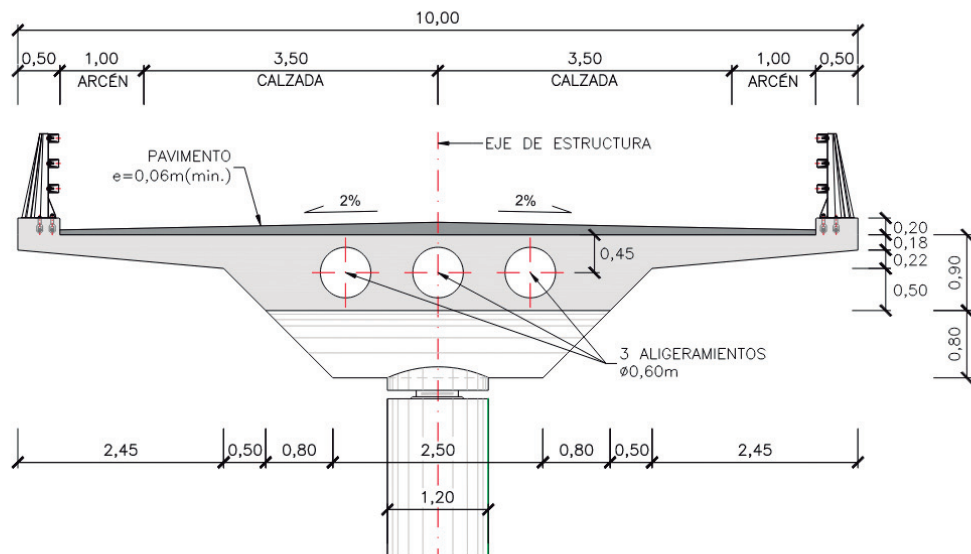
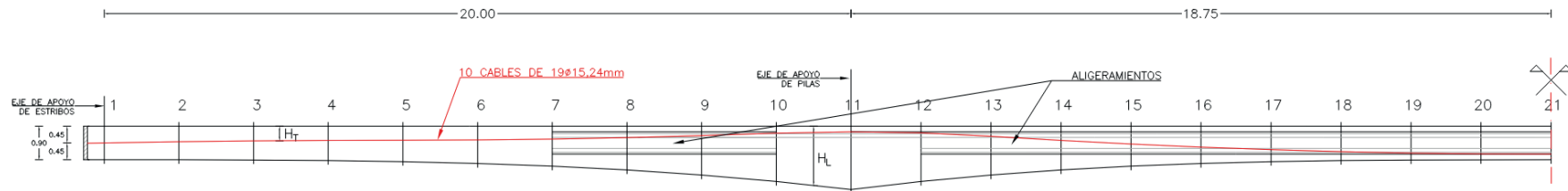


Figura 3 Sección transversal de tablero y pilas

El pretensado está compuesto por 10 cables parabólicos de 19 torones de acero Y 1860 S7 con 15,3 milímetros de diámetro ($A = 140\text{ mm}^2$) cada uno.



SECCION	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
H_T	0,450	0,419	0,394	0,380	0,375	0,368	0,345	0,308	0,255	0,188	0,150	0,180	0,270	0,383	0,480	0,563	0,630	0,683	0,720	0,743	0,750
H_L	0,900	0,901	0,906	0,922	0,951	1,000	1,073	1,174	1,310	1,483	1,700	1,483	1,310	1,174	1,073	1,000	0,951	0,922	0,906	0,901	0,900
A_L	4,100	4,098	4,087	4,057	3,998	3,900	3,754	3,551	3,281	2,934	2,500	2,934	3,281	3,551	3,754	3,900	3,998	4,057	4,087	4,098	4,100

Figura 4 Geometría del pretensado

Las pilas, de hormigón C30/37, están compuestas por un fuste único de sección circular de 1,20 metros de diámetro y alturas de, aproximadamente, 9,0 metros desde su cara superior hasta la cimentación.

El tablero descansa sobre apoyos elastoméricos tanto en pilas como en estribos.

En las pilas, el apoyo es único y circular; en los estribos, se disponen dos apoyos rectangulares separados 6 metros en la parte inferior del tablero y, debido a la existencia de levantamientos, se dispondrá, además, de topes anti-levantamiento con dos apoyos rectangulares separados 8,4 metros entre sí.

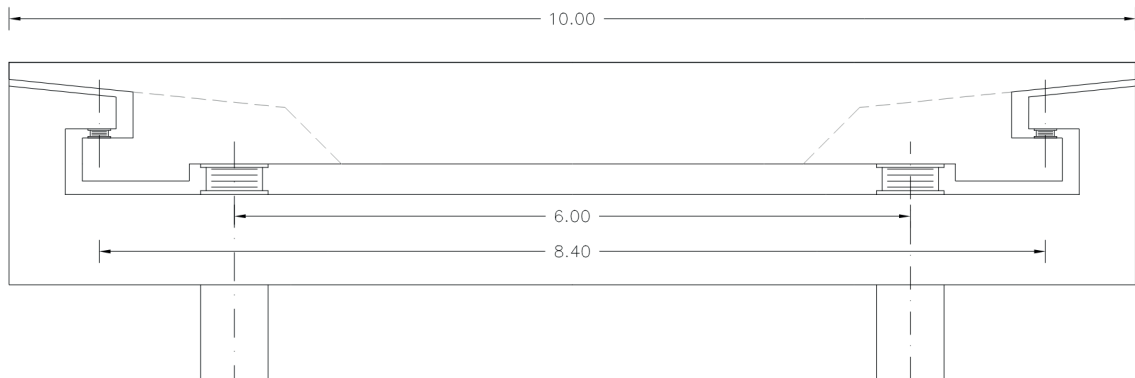


Figura 5 Sección transversal de tablero en eje de estribo

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

3.2 Acciones consideradas

Para el establecimiento de las acciones y obtención de las combinaciones empleadas en la comprobación de los apoyos se ha seguido lo indicado en los siguientes documentos:

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

Las verificaciones realizadas en este ejemplo no tienen en cuenta las acciones sísmicas, es decir, se realiza el cálculo como si el puente estuviera emplazado en una zona donde no fuera

necesario considerar la acción sísmica. En la *Guía para el cálculo de aisladores elastoméricos de bajo amortiguamiento en zona sísmica. Ejemplo de aplicación* [8] se pueden comprobar los ajustes necesarios a las dimensiones de los apoyos cuando éstos se ven afectados por la acción sísmica.

3.2.1 Cargas permanentes

Peso propio

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

Carga muerta

- Pavimento: se considera una densidad de $\gamma_{pav} = 23,0$ kN/m³ y un espesor nominal medio de 10,5 centímetros. Según lo indicado en el Anejo Nacional de UNE-EN 1991-1-1, se tiene en cuenta una desviación inferior del -20 % respecto del espesor teórico definido en el proyecto y una desviación superior del 50 %.
- Pretiles: se adopta un peso del pretil de 0,75 kN/m (por cada lateral) y del zuncho de borde de 2,5 kN/m (0,2 x 0,5 por cada lateral).

Pretensado

Para la determinación de las pérdidas instantáneas del pretensado se ha considerado una penetración de cuñas de 5 milímetros, un coeficiente de rozamiento en curva (μ) de 0,21 y un coeficiente de rozamiento (parásito) por metro lineal, k (K/ μ), de 0,007.

Se han estimado unas pérdidas diferidas del 15 %.

En este ejemplo el acortamiento elástico del hormigón tras el tesado de los cables de pretensado es de 0,16 mm/m.

Acciones reológicas

Las acciones reológicas se han tenido en cuenta según lo definido en UNE-EN 1992-1-1, para una humedad relativa del 65 % y un cemento clase N.

En este ejemplo el acortamiento por retracción y fluencia es de 0,553 mm/m.

3.2.2 Sobrecargas de uso

Cargas verticales

Se ha aplicado el modelo de carga 1 (LM1), tal como se define en el apartado 4.3.2 de UNE-EN 1991-2, que consiste en dos sistemas parciales:

- Cargas concentradas de doble eje (sistema tándem, TS), en el que cada eje tiene el siguiente peso:

$$\alpha_Q \cdot Q_k \quad (1)$$

- Cargas uniformemente distribuidas (sistema UDL) que tienen el siguiente peso por metro cuadrado de carril nominal:

$$\alpha_q \cdot q_k \quad (2)$$

donde

α_Q y α_q factores de ajuste, tomados igual a la unidad, de acuerdo con el Anejo Nacional de UNE-EN 1991-2

Q_k y q_k definen de acuerdo con la tabla 4.2 de UNE-EN 1991-2

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

Localización	Sistema Tándem (TS)	Sistema UDL
	Cargas por eje Q_{ik} [kN]	q_{ik} (o q_{rk}) [kN/m ²]
Carril 1	300	9
Carril 2	200	2,5
Carril 3	100	2,5
Otros carriles	0	2,5
Área restante (q_{rk})	0	2,5

La calzada, de ancho, w , igual a 9 m se ha dividido en tres carriles nominales:

Fuerzas horizontales

- Frenado y arranque, Q_{ik} : el valor característico de esta acción es una fracción del valor de la carga característica vertical que se considere actuando en el carril virtual número 1, y se ha determinado de acuerdo con la siguiente expresión (expresión 4.6 de UNE-EN 1991-2):

$$Q_{ik} = 0,6\alpha_{Q,1} \cdot 2Q_{1k} + 0,1\alpha_{q1} \cdot q_{1k}w_1L \quad (3)$$

El valor Q_{ik} está limitado superior e inferiormente según lo indicado a continuación.

$$180 \text{ kN} \leq Q_{ik} \leq 900 \text{ kN} \quad (4)$$

En este ejemplo, el valor total de la fuerza de frenado es de 570 kN.

- El puente es recto, por lo que no se aplica fuerza centrífuga.

Grupos de cargas de tráfico

La concomitancia de las distintas componentes de la sobrecarga de uso, definidas con anterioridad, se ha tenido en cuenta según la tabla 4.4a del UNE-EN 1991-2.

3.2.3 Viento

Las acciones del viento se han determinado de acuerdo con UNE-EN 1991-1-4.

Valor fundamental de la velocidad básica del viento, $v_{b,0}$

La velocidad básica fundamental del viento $v_{b,0}$ se ha obtenido a partir del mapa de isótacas de la figura AN.1 del Anejo Nacional UNE-EN 1991-1-4. Para este ejemplo, se ha tomado un valor de 27 m/s (Zona B).

Velocidad básica del viento, v_b

Para este ejemplo se considera un periodo de retorno de 100 años, diferente a los 50 años considerados en la elaboración del mapa de la figura AN.1 del Anejo Nacional de UNE-EN 1991-1-4. La velocidad básica del viento $v_{b,0}$ para un periodo de retorno de 100 años se obtiene mediante las siguientes expresiones:

$$v_b(100 \text{ años}) = v_b(50 \text{ años}) \cdot c_{prob} \quad (5)$$

$$c_{prob} = \left(\frac{(1 - K \cdot \ln(-\ln(1 - p)))^n}{1 - K \cdot \ln(-\ln(0,98))} \right) \quad (6)$$

K se toma igual a 0,2 y n igual a 0,5, como se indica en el Anejo Nacional de UNE-EN 1991-1-4, obteniéndose un valor de c_{prob} de 1,04.

Tipo de terreno

Se considera un terreno tipo II.

Simultaneidad de las componentes transversal, longitudinal y vertical del viento

Para tener en cuenta la simultaneidad de las componentes transversal, longitudinal y vertical del viento se ha actuado según lo indicado en el Anejo Nacional de UNE-EN 1991-1-4. El viento transversal sobre el tablero se ha considerado simultáneo con la componente vertical; el viento longitudinal sobre el tablero no se ha considerado simultáneo con ninguna de las restantes componentes, transversal o vertical.

3.2.4 Efectos térmicos

Los efectos térmicos se han determinado según UNE-EN 1991-1-5, para un tablero de hormigón tipo 3.

La acción térmica se ha evaluado considerando la componente uniforme de temperatura y la componente de la diferencia de temperatura vertical.

Componente uniforme de la temperatura del tablero

Para calcular los efectos de la componente uniforme de temperatura se parte del valor de la temperatura del aire a la sombra en el lugar del emplazamiento del puente.

La temperatura máxima del aire a la sombra, $T_{m\acute{a}x}$, se ha obtenido a partir del mapa de isotermas de la figura AN.1 del Anejo Nacional del UNE-EN 1991-1-5; para este ejemplo se ha tomado $T_{m\acute{a}x}$ igual a 48 grados. La temperatura mínima del aire a la sombra, $T_{m\acute{i}n}$, se ha obtenido a partir de la tabla AN.1 del Anejo Nacional del UNE-EN 1991-1-5; para este ejemplo se ha tomado $T_{m\acute{i}n}$ igual a -11 grados. Tanto los valores mostrados en la figura AN.1 como en la tabla AN.1 del Anejo Nacional de UNE-EN 1991-1-5 corresponden a un periodo de retorno de 50 años.

Para periodos de retorno diferentes de 50 años, se deben ajustar los valores de $T_{m\acute{a}x}$ y $T_{m\acute{i}n}$ según las expresiones siguientes (expresiones A.1 y A.2 del Anejo A de UNE-EN 1991-1-5):

$$T_{m\acute{a}x,p} = T_{m\acute{a}x} \{k_1 - k_2 \cdot \ln[-\ln(1-p)]\} \quad (7)$$

$$T_{m\acute{i}n,p} = T_{m\acute{i}n} \{k_3 + k_4 \cdot \ln[-\ln(1-p)]\} \quad (8)$$

Siendo p el inverso del periodo de retorno y considerando $k_1 = 0,781$; $k_2 = 0,056$; $k_3 = 0,393$ y $k_4 = -0,156$, según lo indicado en el Anejo Nacional de UNE-EN 1991-1-5.

Para situaciones persistentes, se considera un periodo de retorno de 100 años ($p = 0,01$), siendo por lo tanto $T_{m\acute{a}x,100} = 1,04 T_{m\acute{a}x}$ y $T_{m\acute{i}n,100} = 1,11 T_{m\acute{i}n}$.

De acuerdo con lo indicado en el Anejo Nacional de UNE-EN 1991-1-5, el dimensionamiento de los apoyos se ha realizado considerando como máxima variación de contracción de la componente uniforme de la temperatura el valor de $(\Delta_{TN,con} + 15)$ °C y como máxima variación de dilatación de la componente uniforme de la temperatura el valor de $(\Delta_{TN,exp} + 15)$ °C.

Para el dimensionamiento de los apoyos se ha considerado una máxima variación de contracción de la componente uniforme de la temperatura, $\Delta_{TN,con}$, de 34,2 grados y una máxima variación de dilatación de la componente uniforme de la temperatura, $\Delta_{TN,exp}$, de 51,9 grados.

Componente de la diferencia de temperatura vertical

Para la consideración de la diferencia vertical de temperatura, y de acuerdo con el Anejo Nacional de UNE-EN 1991-1-5, al tratarse de una estructura de hormigón, se adopta el plan-

teamiento 1, que plantea el empleo de una componente lineal equivalente de la diferencia de temperatura, es decir una diferencia de temperatura entre las fibras superior e inferior del tablero, $\Delta T_{M,heat}$ y $\Delta T_{M,cool}$.

Los valores de $\Delta T_{M,heat}$ y $\Delta T_{M,cool}$ se han tomado de la tabla 6.1 de UNE-EN 1991-1-5, según se indica en el Anejo Nacional, iguales a 15 °C y 8 °C, respectivamente.

Simultaneidad de la componente uniforme y de la diferencia de temperatura vertical

Cuando ha sido necesario tener en cuenta la actuación simultánea de la variación de la componente uniforme, $\Delta T_{N,exp}$ o $\Delta T_{N,con}$, y la diferencia de temperatura vertical, $\Delta T_{M,heat}$ o $\Delta T_{M,cool}$, ambas componentes se han combinado según con lo indicado en el apartado 6.1.5 de UNE-EN 1991-1-5 y su Anejo Nacional:

$$\Delta T_N + \omega_M \cdot \Delta T_M \quad (9)$$

$$\omega_N \cdot \Delta T_N + \Delta T_M \quad (10)$$

con $\omega_N = 0,35$ y $\omega_M = 0,75$.

3.3 Coeficientes parciales y de combinación

Valores de cálculo de las acciones

Las comprobaciones de los apoyos elastoméricos se realizan en Estado Límite Último (en situación persistente o transitoria), según lo indicado en el apartado 5.1 de UNE-EN 1337-3.

El valor de cálculo de una acción se obtiene multiplicando su valor representativo por el correspondiente coeficiente parcial, γ_F .

Los coeficientes parciales empleados en este ejemplo se han tomado de la tabla AN.9 del Anejo Nacional de UNE-EN 1990 (tabla A2.4 (B) de UNE-EN 1990), que define los coeficientes parciales, γ_F , para los Estados Límite Último de comprobaciones de resistencia (STR).

Coeficientes de combinación de las acciones variables

Para la consideración de simultaneidad entre los efectos de distintas acciones variables, se tienen en cuenta:

- El valor de cálculo de la acción variable dominante, $\gamma_{Q,1} Q_{k,1}$
- Los valores de combinación de cálculo del resto de acciones concomitantes, $\gamma_{Q,i} \Psi_{0,i} Q_{k,i}$

Los valores de los coeficientes de combinación Ψ de cada acción se han tomado de la tabla AN.5 del Anejo Nacional de UNE-EN 1990 (tabla A2.1 de UNE-EN 1990).

3.4 Consideraciones generales

Las dimensiones, tanto en altura total de elastómero como en área en planta, de un apoyo elastomérico varían considerablemente en función de la ubicación de la estructura y, principalmente, de la necesidad o no de la consideración de la acción sísmica. Para que se puedan analizar los cambios necesarios a las dimensiones de los apoyos de una estructura por la consideración de la acción sísmica, la *Guía para el cálculo de aisladores elastoméricos de bajo amortiguamiento en zona sísmica. Ejemplo de aplicación* [8] también emplea como ejemplo esta misma estructura. Por un lado, en esta guía, se realizan las comprobaciones exigidas por UNE-EN 1337-3 suponiendo que la estructura se encuentra en una zona para la cual no es necesario tener en cuenta la acción sísmica; por otro lado, en la *Guía para el cálculo de aisladores elastoméricos de bajo amortiguamiento en zona sísmica. Ejemplo de aplicación* [8] teniendo en cuenta las acciones sísmicas, se realizarán las comprobaciones exigidas tanto por UNE-EN 1337-3 como por UNE-EN 15129, y se determinarán las nuevas dimensiones necesarias para los apoyos en estas condiciones, que ya tendrán consideración de aisladores elastoméricos.

Se considera que los apoyos dimensionados en este ejemplo tienen el caucho natural (NR) o caucho de neopreno (CR) como polímero base y un módulo de elasticidad transversal convencional, G_g según UNE-EN 1337-3, de 0,9 MPa. Como viene siendo práctica habitual en el proyecto de puentes y de acuerdo con varias referencias bibliográficas, frente al efecto de las acciones rápidas (frenado, fuerza centrífuga, viento, etc.), se ha adoptado un valor del módulo de elasticidad transversal de los apoyos de, aproximadamente, dos veces el módulo de elasticidad transversal para deformaciones lentas, es decir, 1,8 MPa, tanto a la hora de realizar las verificaciones de los apoyos como a la hora de determinar el reparto de estas fuerzas por los diferentes ejes (véase también el apartado 4.2.4 de la *Guía para el cálculo de apoyos elastoméricos* [6]).

Dada la simetría en alzado de la estructura, y para no repetir innecesariamente el mismo tipo de cálculo, las verificaciones llevadas a cabo en esta guía se realizarán únicamente para los apoyos del estribo E1 y pila P1, puesto que las reacciones en los estribos E1 y E2 y en las pilas P1 y P2 son idénticas.

Las placas de zunchado internas de los apoyos laminados son de acero de clase S235.

4

PREDIMENSIONAMIENTO DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS APOYOS

La definición de los apoyos de una estructura implica, inevitablemente, un cálculo iterativo. Si bien la distribución de las cargas verticales no es dependiente de la geometría de los apoyos, sí lo es la distribución de las fuerzas horizontales y el reparto de los desplazamientos generados por las deformaciones impuestas entre apoyos y subestructura.

Dado que en la fase de predimensionamiento se desconoce la geometría de los apoyos, se procederá de la siguiente forma en lo relativo a las fuerzas y desplazamientos horizontales:

- Obviando, por ahora, la diferente rigidez que aportan pilas y estribos, las fuerzas horizontales longitudinales se repartirán igualmente por cada eje.

En el caso del frenado, de valor total igual a 570 kN, se supone que cada eje recoge 142,5 kN ($E1 = P1 = P2 = E2$).

En el caso de la presión del viento longitudinal, $q_{w,l}$, de valor medio igual a 1,25 kN/m si se considera concomitante con la sobrecarga sobre el tablero y 0,65 kN/m si no se considera la presencia de la sobrecarga sobre el tablero², tendríamos:

$$\bullet F_{wl,E1} = F_{wl,E2} = F_{wl,P1} = F_{wl,P2} = q_{w,l} \cdot (20 + 37,5 + 20) / 4 = 24,2 \text{ kN (con sobrecarga sobre el tablero) o } 12,6 \text{ kN (sin concomitancia con la sobrecarga)}$$

Comentario: en el predimensionamiento se desprecian las fuerzas longitudinales de rozamiento que se podrían generar en los apoyos deslizantes de los topes anti-levantamiento.

² Según la tabla AN.5 del Anejo Nacional de UNE-EN 1990, el coeficiente de combinación del viento con las restantes cargas variables, Ψ , es 0,6 por lo que la carga del viento considerando la concomitancia con la sobrecarga siempre es superior la carga del viento sin la concomitancia de la sobrecarga.

- Obviando, por ahora, la diferente rigidez que aportan pilas y estribos, las fuerzas horizontales transversales se asumen repartidas en función del ancho tributario de cada eje. En este ejemplo, la única fuerza transversal horizontal actuante es el viento. Si $q_{w,t}$ es la fuerza de viento en kN/m, se admitirá la siguiente distribución de la carga:

- $F_{wt,E1} = F_{wt,E2} = q_{w,t} \cdot (20/2)$ kN

- $F_{wt,P1} = F_{wt,P2} = q_{w,t} \cdot (20/2 + 37,5/2)$ kN

En este ejemplo se tiene una fuerza característica de viento media de 5,65 kN/m considerando la sobrecarga sobre el tablero y 2,95 kN/m sin concomitancia con la sobrecarga³.

- $F_{wt,E1} = F_{wt,E2} = 56,5$ kN (con sobrecarga sobre el tablero) o 29,5 kN (sin concomitancia con la sobrecarga)
- $F_{wt,P1} = F_{wt,P2} = 162,5$ kN (con sobrecarga sobre el tablero) o 84,8 kN (sin concomitancia con la sobrecarga)
- En lo relativo a los desplazamientos debido a las deformaciones impuestas:
 - En estribos, la totalidad de las deformaciones impuestas por el tablero las asumen los apoyos, puesto que el estribo puede considerarse infinitamente más rígido que éstos.
 - En los ejes de pilas, se considera, como primera aproximación, que el desplazamiento se reparte al 50 % entre apoyo y cabeza de pila.
 - Dada la simetría del tablero, para el predimensionamiento se considerará que el punto fijo de la estructura se encuentra en el centro de la misma (a 38,75 metros de los estribos).

En este ejemplo, el acortamiento por retracción y fluencia es de 0,553 mm/m, el acortamiento elástico del hormigón tras el tesado de los cables de pretensado es de 0,16 mm/m, y las variaciones térmicas generan una dilatación de 0,519 mm/m y una contracción de 0,342 mm/m.

Para el predimensionamiento de los apoyos, se buscará una geometría que permita verificar tres condiciones:

- Cumplimiento de la tensión mínima bajo cargas permanentes: se determinarán unas dimensiones que permitan garantizar que, bajo cargas permanentes, la tensión de compresión del apoyo no es inferior a 3 MPa, tal como indica la norma UNE-EN 1337-3 en su apartado 5.3.3.6. El cumplimiento de esta condición busca evitar la reptación del apoyo.
- Cumplimiento de la tensión máxima de compresión en Estado Límite Último: la norma UNE-EN 1337-3 limita la tensión máxima de compresión de los apoyos en Estado Límite Último mediante la verificación de la condición de estabilidad a pandeo

³ Véase la nota al pie número 2.

expuesta en su apartado 5.3.3.6. Tal como se ha descrito en el apartado 6.3.2 de la *Guía para el cálculo de apoyos elastoméricos* [6] esta condición es equivalente a la limitación tradicional de 15 MPa, para combinaciones de Estado Límite de Servicio, que definían las Recomendaciones de 1982. Por tanto, para el predimensionamiento de los apoyos, se limitará la tensión de compresión a 20-25 MPa, en Estado Límite Último (equivalente a 14-18 MPa en Estado Límite de Servicio).

- Cumplimiento de la condición de máxima deformación tangencial por desplazamientos horizontales: se determinará la altura total de elastómero que permita cumplir con la condición de deformación inferior a 1,0 indicada en el apartado 5.3.3.3 de UNE-EN 1337-3.

Según el apartado 5.3.3.3 de UNE-EN 1337-3:

$$\varepsilon_{q,d} = \frac{v_{xy,d}}{T_q} \leq 1,00 \quad (11)$$

donde:

$$v_{xy,d} = \sqrt{\left(v'_{x,d} + \frac{F''_{x,d} \cdot T_q}{G \cdot A}\right)^2 + \left(v'_{y,d} + \frac{F''_{y,d} \cdot T_q}{G \cdot A}\right)^2} \quad (12)$$

$$v_{xy,d} = \sqrt{(v'_{x,d} + v''_{x,d})^2 + (v'_{y,d} + v''_{y,d})^2} \quad (13)$$

$$v_{xy,d} = \sqrt{v_{x,d}^2 + v_{y,d}^2} \quad (14)$$

y donde:

G módulo de elasticidad transversal teniendo en cuenta las consideraciones indicadas en el apartado 3.4 de esta guía para la actuación de acciones instantáneas (rápidas)

$v_{xy,d}$ máximo desplazamiento horizontal de cálculo, obtenido por la suma vectorial del desplazamiento en la dirección perpendicular al eje del tablero (transversal) con el desplazamiento en la dirección del eje del tablero (longitudinal), generado tanto por las fuerzas instantáneas como deformaciones impuestas (véanse las expresiones (12) y (13))

$v_{x,d} = v'_{x,d} + v''_{x,d}$ desplazamiento horizontal en la dirección de la dimensión a del apoyo (que, en general, coincide con la dirección del eje del tablero (longitudinal)) generado por las deformaciones impuestas y las fuerzas instantáneas

$v'_{x,d}$ desplazamiento horizontal en la dirección de la dimensión a del apoyo (que, en general, coincide con la dirección del eje del tablero (longitudinal)) generado por las deformaciones impuestas

$v''_{x,d}$ desplazamiento horizontal en la dirección del eje del tablero (longitudinal) generado por las fuerzas instantáneas

$v_{y,d} = v'_{y,d} + v''_{y,d}$ desplazamiento horizontal en la dirección de la dimensión b del apoyo (que, en general, coincide con la dirección perpendicular al eje del tablero (transversal)) generado por las deformaciones impuestas y las fuerzas instantáneas

$v'_{y,d}$ desplazamiento horizontal en la dirección de la dimensión b del apoyo (que, en general, coincide con la dirección perpendicular al eje del tablero (transversal)) generado por las deformaciones impuestas

$v''_{y,d}$ desplazamiento horizontal en la dirección de la dimensión b del apoyo (que, en general, coincide con la dirección perpendicular al eje del tablero (transversal)) generado por las fuerzas instantáneas

$F''_{x,d}$ fuerza horizontal instantánea de cálculo en la dirección de la dimensión a del apoyo

$F''_{y,d}$ fuerza horizontal instantánea de cálculo en la dirección de la dimensión b del apoyo

T_q espesor total del material elastómero que deforma a cortante, incluyendo las capas exteriores siempre y cuando su deformación a cortante no esté restringida

4.1 Predimensionamiento de apoyos en pilas

En este apartado se estiman las dimensiones de los apoyos de pilas mediante el cumplimiento de las premisas indicadas en el apartado 4. Se dispondrá un único apoyo, circular, por cada eje de pila. La decisión sobre el anclaje de estos apoyos se tomará en función de los resultados obtenidos para las distintas verificaciones exigidas por UNE-EN 1337-3. En la tabla siguiente se recogen las reacciones verticales máximas y mínimas en Estado Límite Último generadas únicamente por las cargas verticales (cargas permanentes, sobrecarga vehicular, gradiente térmico y viento vertical) y también la reacción vertical correspondiente a la hipótesis de carga permanente mínima.

Tabla 2 Reacciones verticales en los apoyos de pilas, únicamente debido a cargas permanentes, sobrecarga vehicular, gradiente térmico y viento vertical

Combinación	$F_{z,d,l}^{(a)}$ [kN]
$F_{z,d,máx}$	12.871,6
$F_{z,d,mín}$	5.153,8
$F_{z,d,mín} (CP_{mínima})$	5.811,6

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

- Cumplimiento de la tensión mínima de compresión de 3 MPa para la hipótesis de cargas permanentes:

Con esta comprobación se limitará superiormente el área en planta del apoyo. Para garantizar una tensión mínima de 3 MPa en la hipótesis de cargas permanentes ($F_{z,d,min,CP} = 5811,6$ kN, véase la tabla 2) el área en planta del apoyo deberá ser igual o inferior a $1,94$ m² que correspondería a un diámetro máximo de 1,57 metros.

- Cumplimiento de la tensión de compresión máxima en Estado Límite Último:

Tal como se recoge en la tabla 2 de esta guía, los apoyos a colocar en los ejes de pilas estarán sometidos a una compresión máxima en Estado Límite Último de, aproximadamente, 12.900 kN. Admitiendo una tensión media de unos 20-25 MPa se tiene:

Tabla 3 Estimación de las dimensiones mínimas en planta de los apoyos en pilas

$F_{z,min}$ [kN]	$\sigma_{máx}$ [MPa]	$A'_{min}^{(b)}$ [mm ²]	$a^{(a)}$ [mm]	$A'^{(b)}$ [mm ²]	$\checkmark A' > A'_{min}?$
12.900	21	614.286	900	622.114	OK

^(a) Dimensiones elegidas según la tabla 3 de UNE-EN 1337-3 que define los tamaños normalizados de los apoyos.

^(b) A' se ha determinado considerando un recubrimiento lateral de las placas de zunchado de acero de 5 milímetros.

Un apoyo de 900 milímetros de diámetro en planta cumpliría la condición de tensión de compresión máxima de 21 MPa en Estado Límite Último.

- Cumplimiento de la condición de máxima deformación tangencial por desplazamientos horizontales:

En la tabla siguiente se incluye un resumen de los valores característicos de las fuerzas y desplazamientos horizontales estimados para los apoyos de pilas, determinados según los criterios indicados en el apartado 4.

Tabla 4 Estimación de fuerzas y desplazamientos horizontales característicos en los apoyos de pilas

Fuerza horizontal longitudinal de frenado	$F''_{x,k}$	$\pm 142,5$ kN por eje; $\pm 142,5$ kN por apoyo
Fuerza horizontal longitudinal de viento (con sobrecarga) ^(a)		$\pm 24,2$ kN por eje; $\pm 24,2$ kN por apoyo
Fuerza horizontal transversal de viento (con sobrecarga) ^(a)	$F''_{y,k}$	$\pm 162,5$ kN por eje; $\pm 162,5$ kN por apoyo
Reológico	$v'_{x,k}$	-0,553 mm/m*18,75 m = -10,4 mm; 5,2 mm en el apoyo ^(b)
Acortamiento elástico del pretensado		-0,16 mm/m*18,75 m = -3 mm; 1,5 mm en el apoyo ^(b)
Contracción térmica		-0,342 mm/m*18,75 m = -6,4 mm; 3,2 mm en el apoyo ^(b)
Dilatación térmica		0,519 mm/m*18,75 m = 9,7 mm; 4,85 mm en el apoyo ^(b)

^(a) Se considera el caso más desfavorable: viento concomitante con la sobrecarga sobre el tablero. Según la tabla AN.5 del Anejo Nacional de UNE-EN 1990, el coeficiente de combinación del viento con las restantes cargas variables, Ψ , es 0,6 por lo que la carga del viento considerando la concomitancia con la sobrecarga siempre es superior la carga del viento sin la concomitancia de la sobrecarga.

^(b) En los ejes de pilas, se admitirá que el desplazamiento se reparte de forma igual entre apoyo y cabeza de pila.

Como todas las comprobaciones de UNE-EN 1337-3, la comprobación de la máxima deformación tangencial debe ser realizada en Estado Límite Último. En la tabla siguiente se presentan las hipótesis que generan los máximos desplazamientos y fuerzas horizontales y el valor mínimo que, para un diámetro de 900 milímetros, permitiría cumplir la condición definida por la expresión (11).

- Hipótesis 1: Máximo desplazamiento y fuerza longitudinal (frenado dominante con térmico concomitante).
- Hipótesis 2: Máximo desplazamiento y fuerza longitudinal (térmico dominante).
- Hipótesis 3: Máximo desplazamiento longitudinal concomitante con máximo desplazamiento transversal (viento transversal con sobrecarga).

Como viene siendo práctica habitual en el proyecto de puentes y de acuerdo con varias referencias bibliográficas, para considerar el efecto de las acciones rápidas (frenado, fuerza centrífuga, viento, etc.) sobre la rigidez del apoyo, se ha adoptado un valor del módulo de elasticidad transversal de los apoyos de, aproximadamente, dos veces el módulo de elasticidad transversal para deformaciones lentas, es decir, 1,8 MPa (para más información véase el apartado 4.2.4 de la *Guía para el cálculo de apoyos elastoméricos* [6]).

Tabla 5 Estimación del mínimo espesor total [mm] de elastómero, T_q , de los apoyos de pilas

Hip.	$F''_{x,d}$ (a) [kN]	$F''_{y,d}$ (b) [kN]	$v'_{x,d}$ (c) [mm]	$v'_{y,d}$ (d) [mm]	$v''_{x,d}$ (e) [mm]	$v''_{y,d}$ (f) [mm]	$T_{q,min}$ [mm]	$v_{xy,d}$ (g) [mm]	$\varepsilon_{q,d} = v_{xy,d} / T_q$
1	192,4	0,0	11,4	0,0	$0,168T_q$	0,0	20	14,8	0,74
2	0,0	0,0	13,3	0,0	0,0	0,0		13,3	0,67
3	0,0	146,3	8,5	0,0	0,0	$0,131T_q$		8,9	0,45

- ^(a) Fuerzas instantáneas horizontales de cálculo (viento, frenado, etc.) en la dirección del eje del tablero (longitudinal).
- ^(b) Fuerzas instantáneas horizontales de cálculo (viento) en la dirección perpendicular al eje del tablero (transversal).
- ^(c) Desplazamientos de cálculo debido a deformaciones impuestas (retracción, fluencia, dilataciones/contracciones térmicas, etc.) en la dirección del eje del tablero (longitudinal).
- ^(d) Desplazamientos de cálculo debido a deformaciones impuestas (retracción, fluencia, dilataciones/contracciones térmicas, etc.) en la dirección perpendicular del eje del tablero (transversal).
- ^(e) Desplazamientos de cálculo en la dirección del eje del tablero (longitudinal) debido a las fuerzas instantáneas, $F''_{x,d}$. Véanse las expresiones (12) y (13). Para la determinación de estos desplazamientos se ha empleado un módulo de elasticidad transversal de $2G=1,8\text{MPa}$.
- ^(f) Desplazamientos de cálculo en la dirección perpendicular al eje del tablero (transversal) debido a las fuerzas instantáneas, $F''_{y,d}$. Véanse las expresiones (12) y (13). Para la determinación de estos desplazamientos se ha empleado un módulo de elasticidad transversal de $2G = 1,8\text{MPa}$.
- ^(g) Desplazamiento total de cálculo (véanse las ecuaciones (12),(13) y (14)), debido a deformaciones impuestas y fuerzas instantáneas.

La cercanía al punto fijo de la estructura y la elevada área en planta necesaria, A'_{min} , para cumplir con los límites de compresión máxima fomentan desplazamientos reducidos en estos apoyos. Como se puede observar en la tabla anterior, un espesor total de elastómero de 20 milímetros sería suficiente para hacerse cumplir la condición $\varepsilon_{q,d} \leq 1,0$, no obstante, este espesor es inferior al valor mínimo del espesor total de elastómero recogido en la tabla 3 de UNE-EN 1337-3 para un apoyo de 900 milímetros de diámetro.

Así, y siguiendo los criterios recogidos en la tabla 3 de UNE-EN 1337-3 que define los tamaños normalizados de los apoyos elastoméricos, se estima que los apoyos de pilas tendrán las siguientes características:

Tabla 6 Predimensionamiento: características de los apoyos de pilas

Apoyos		Dimensiones en planta [mm]	Capas de elastómero ^(a) [mm]
Pilas	Un apoyo circular	900	2 x 2,5 + 4 x 20 = 85 milímetros

^(a) En el predimensionamiento se suponen que estos apoyos no estarán anclados (apoyos tipo B), por lo que se disponen dos capas externas de elastómero de 2,5 milímetros de espesor.

4.2 Predimensionamiento de apoyos de estribos

En este apartado se estiman las dimensiones de los apoyos de estribos mediante el cumplimiento de las premisas indicadas en el apartado 4 de esta guía. Tal como se ha indicado en el apartado de descripción de la estructura, en cada eje de estribo se colocarán dos apoyos con una separación, en la dirección transversal, de 6 metros.

En la tabla siguiente se recogen las combinaciones que dan origen a las reacciones verticales máximas y mínimas en Estado Límite Último. Para la obtención de estas reacciones se han tenido en cuenta únicamente las cargas conocidas en el predimensionamiento, es decir, las cargas verticales (cargas permanentes, sobrecarga vehicular, gradiente térmico y viento vertical), habiéndose despreciado las reacciones verticales resultantes del momento torsor generado por el viento transversal.

Tabla 7 Reacciones verticales en los apoyos de estribos, únicamente debido a cargas permanentes, sobrecarga vehicular, gradiente térmico y viento vertical (Estado Límite Último)

Combinación	$F_{z,d,1}^{(a) (b)}$ [kN]	$F_{z,d,2}^{(a) (b)}$ [kN]
$F_{z,d,máx}$	2.574,3	275,7
$F_{z,d,mín}$	1.298,9	-790,7

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

^(b) $F_{z,d,1}$ fuerza vertical en apoyo 1; $F_{z,d,2}$ fuerza vertical en apoyo 2.

Como se puede observar en la tabla 7, para las combinaciones de carga estudiadas, se obtienen reacciones negativas en uno de los apoyos, es decir, hay levantamiento del tablero en uno de los apoyos. Por ello, se coloca un sistema de apoyos invertidos que, para las situaciones descritas, funciona como tope anti-levantamiento, comprimiendo los apoyos superiores (véase la figura 6). Los apoyos superiores tendrán una separación de 8,4 metros, como se puede observar en la figura 7.

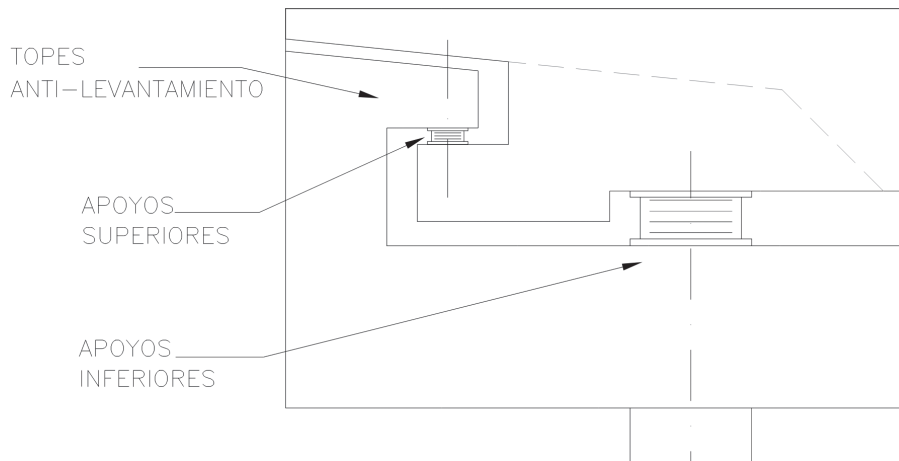


Figura 6 Sistema de apoyos invertidos (topes anti-levantamiento)

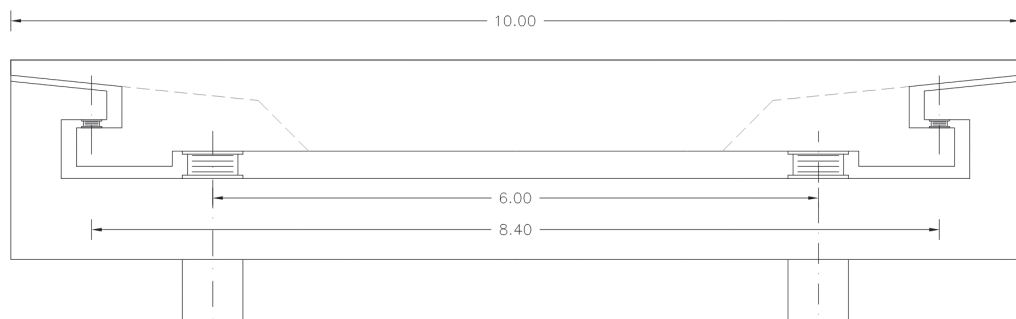


Figura 7 Sistema de apoyos invertidos (topes anti-levantamiento)

Dada la posibilidad de concomitancia entre cargas verticales reducidas (incluso levantamiento) y giros y fuerzas y desplazamientos horizontales en los apoyos inferiores, estos estarán anclados al estribo para evitar su reptado. Los apoyos superiores (apoyos del tope anti-levantamiento) también estarán anclados, pero permitirán el movimiento libre del tablero tanto en la dirección longitudinal como transversal (apoyos deslizantes).

Al estar anclados y al disponerse de topes anti-levantamiento, la necesidad de garantizar una carga mínima de compresión de 3 MPa para la hipótesis de cargas permanentes en los apoyos inferiores deja de ser aplicable.

En este apartado se procederá a predimensionar tanto los apoyos inferiores como los apoyos superiores a disponer en los estribos.

Apoyos inferiores

- Cumplimiento de la tensión de compresión máxima en Estado Límite Último:

Se determina el área mínima del apoyo que permite limitar la presión de contacto a unos 20-25 MPa. Se estima que la reacción máxima de compresión en los apoyos inferiores será de, aproximadamente, 2.600 kN.

Tabla 8 Estimación de las dimensiones en planta de los apoyos inferiores en estribos

$F_{z, min}$ [kN]	σ_{max} [MPa]	A'_{min} [mm ²]	$a^{(a)}$ (dir long) [mm]	$b^{(a)}$ (dir transv) [mm]	$A'^{(b)}$ [mm ²]	$\dot{A}' >$ $A'_{min}?$
2.600	20	130.000	300	500	142.100	OK

^(a) Dimensiones elegidas según la tabla 3 de UNE-EN 1337-3 que define los tamaños normalizados de los apoyos.

^(b) Se ha determinado A' considerando un recubrimiento lateral de las placas de zunchado de acero de 5 milímetros.

Un apoyo de 300 x 500 milímetros ($a \times b$) en planta cumpliría la condición de tensión de compresión máxima de 20 MPa en Estado Límite Último.

- Cumplimiento de la condición de máxima deformación tangencial por desplazamientos horizontales:

En la tabla siguiente se incluye un resumen de los valores característicos de las fuerzas y desplazamientos horizontales estimados para los apoyos inferiores de los estribos, determinados según los criterios indicados en el apartado 4.

Tabla 9 Estimación de fuerzas y desplazamientos horizontales característicos en los apoyos inferiores de los estribos

Fuerza horizontal longitudinal de frenado	$F''_{x,k}$	$\pm 142,5$ kN por eje; $\pm 71,25$ kN por apoyo
Fuerza horizontal longitudinal de viento (con sobrecarga) ^(a)		$\pm 24,2$ kN por eje; $\pm 12,1$ kN por apoyo
Fuerza horizontal transversal de viento (con sobrecarga) ^(a)	$F''_{y,k}$	$\pm 56,5$ kN por eje; $\pm 28,25$ kN por apoyo
Reológico	$v'_{x,k}$	$-0,553$ mm/m $\cdot 38,75$ m = $-21,4$ mm ^(b)
Acortamiento elástico del pretensado		$-0,16$ mm/m $\cdot 38,75$ m = $-6,2$ mm ^(b)
Contracción térmica		$-0,342$ mm/m $\cdot 38,75$ m = $-13,3$ mm ^(b)
Dilatación térmica		$0,519$ mm/m $\cdot 38,75$ m = $20,1$ mm ^(b)

^(a) Se considera el caso más desfavorable: viento concomitante con la sobrecarga sobre el tablero. Según la tabla AN.5 del Anejo Nacional de UNE-EN 1990, el coeficiente de combinación del viento con las restantes cargas variables, ψ , es 0,6 por lo que la carga del viento considerando la concomitancia con la sobrecarga siempre es superior a la carga del viento sin la concomitancia de la sobrecarga.

^(b) Todo el desplazamiento corresponderá a desplazamiento en los apoyos puesto que se considera que el estribo es infinitamente más rígido que éstos.

Como todas las comprobaciones de UNE-EN 1337-3, la comprobación de la máxima deformación tangencial debe ser realizada en Estado Límite Último. En la tabla siguiente se presentan las hipótesis que generan los máximos desplazamientos y fuerzas horizontales y la altura mínima de elastómero que, para las dimensiones en planta estimadas anteriormente (300 x 500 milímetros) permitiría cumplir la condición definida por la expresión (11).

- Hipótesis 1: Máximo desplazamiento y fuerza longitudinal (frenado dominante con térmico concomitante).
- Hipótesis 2: Máximo desplazamiento y fuerza longitudinal (térmico dominante).
- Hipótesis 3: Máximo desplazamiento longitudinal concomitante con máximo desplazamiento transversal (viento transversal con sobrecarga).

Como viene siendo práctica habitual en el proyecto de puentes y de acuerdo con varias referencias bibliográficas, para considerar el efecto de las acciones rápidas (frenado, fuerza centrífuga, viento, etc.) sobre la rigidez del apoyo, se ha adoptado un valor del módulo de elasticidad transversal de los apoyos de, aproximadamente, dos veces el módulo de elasticidad transversal para deformaciones lentas, es decir, 1,8 MPa (para más información véase el apartado 4.2.4 de la *Guía para el cálculo de apoyos elastoméricos* [6]).

Tabla 10 Estimación del espesor mínimo total de elastómero, T_q , de los apoyos inferiores

Hip.	$F''_{x,d}$ (a) [kN]	$F''_{y,d}$ (b) [kN]	$v'_{x,d}$ (c) [mm]	$v'_{y,d}$ (d) [mm]	$v''_{x,d}$ (e) [mm]	$v''_{y,d}$ (f) [mm]	$T_{q,min}$ [mm]	$v_{xy,d}$ (g) [mm]	$\varepsilon_{q,d} = v_{xy,d}/T_q$
1	96,2	0,0	47,1	0,0	$0,356T_q$	0,0	74	73	0,99
2	0,0	0,0	55,0	0,0	0,0	0,0		55	0,74
3	0,0	25,4	35,1	0,0	0,0	$0,094T_q$		36	0,48

- (a) Fuerzas instantáneas horizontales de cálculo (viento, frenado, etc.) en la dirección del eje del tablero (longitudinal).
- (b) Fuerzas instantáneas horizontales de cálculo (viento) en la dirección perpendicular al eje del tablero (transversal).
- (c) Desplazamientos de cálculo debido a deformaciones impuestas (retracción, fluencia, dilataciones/contracciones térmicas, etc.) en la dirección del eje del tablero (longitudinal).
- (d) Desplazamientos de cálculo debido a deformaciones impuestas (retracción, fluencia, dilataciones/contracciones térmicas, etc.) en la dirección perpendicular del eje del tablero (transversal).
- (e) Desplazamientos de cálculo en la dirección del eje del tablero (longitudinal) debido a las fuerzas instantáneas, $F''_{x,d}$. Véanse las expresiones (12) y (13). Para la determinación de estos desplazamientos se ha empleado un módulo de elasticidad transversal de $2G=1,8$ MPa.
- (f) Desplazamientos de cálculo en la dirección perpendicular al eje del tablero (transversal) debido a las fuerzas instantáneas, $F''_{y,d}$. Véanse las expresiones (12) y (13). Para la determinación de estos desplazamientos se ha empleado un módulo de elasticidad transversal de $2G=1,8$ MPa.
- (g) Desplazamiento total de cálculo (véanse las ecuaciones (12),(13) y (14)), debido a deformaciones impuestas y fuerzas instantáneas.

La hipótesis más desfavorable para esta comprobación es la hipótesis para la que se obtiene el máximo desplazamiento horizontal, $v_{xy,d}$, (Hipótesis 1). Para las fuerzas y desplazamientos que le corresponden y las dimensiones en planta estimadas anteriormente (300 x 500 milímetros), la condición recogida en la ecuación (11) se cumple para un valor mínimo de T_q de 74 milímetros. No obstante, según la tabla 3 de UNE-EN 1337-3 en la que se recogen las dimensiones normalizadas de los apoyos elastoméricos, la altura total máxima de elastómero para un apoyo de 300 x 500 milímetros en planta es de 72 milímetros. Por tanto, en este caso, para el cumplimiento de la condición $\varepsilon_{q,d} \leq 1,0$ se tendrán que incrementar las dimensiones en planta del apoyo (y, por ende, la rigidez, lo que reducirá el desplazamiento generado por las fuerzas instantáneas).

Adoptando unas dimensiones del apoyo de 300 x 600⁴ ($a \times b$) milímetros, el valor mínimo del espesor total de elastómero que permite cumplir con la condición recogida en la ecuación (11) es de 68 milímetros y se puede obtener con seis capas de elastómero de 12 milímetros, ($T_q = 72$ milímetros), características acordes a los tamaños normalizados definidos en la tabla 3 de UNE-EN 1337-3.

En la tabla siguiente se procede a verificar la condición incluida en la expresión (11) con las nuevas dimensiones estimadas para los apoyos: 300 x 600 x 72.

Tabla 11 Estimación del mínimo espesor total de elastómero, T_q , de los apoyos inferiores

Combinación.	$F''_{x,d}$ ^(a) [kN]	$F''_{y,d}$ ^(b) [kN]	$v'_{x,d}$ ^(c) [mm]	$v'_{y,d}$ ^(d) [mm]	$v''_{x,d}$ ^(e) [mm]	$v''_{y,d}$ ^(f) [mm]	$T_{q,min}$ [mm]	$v_{xy,d}$ ^(g) [mm]	$\varepsilon_{q,d} = v_{xy,d} / T_q$
1	96,2	0,0	47,1	0,0	$0,297T_q$	0,0	72	68	0,95
2	0,0	0,0	55,0	0,0	0,0	0,0		55	0,76
3	0,0	25,4	35,1	0,0	0,0	$0,078T_q$		36	0,49

^(a) Fuerzas instantáneas horizontales de cálculo (viento, frenado, etc.) en la dirección del eje del tablero (longitudinal).

^(b) Fuerzas instantáneas horizontales de cálculo (viento) en la dirección perpendicular al eje del tablero (transversal).

^(c) Desplazamientos de cálculo debido a deformaciones impuestas (retracción, fluencia, dilataciones/contracciones térmicas, etc.) en la dirección del eje del tablero (longitudinal).

^(d) Desplazamientos de cálculo debido a deformaciones impuestas (retracción, fluencia, dilataciones/contracciones térmicas, etc.) en la dirección perpendicular del eje del tablero (transversal).

^(e) Desplazamientos de cálculo en la dirección del eje del tablero (longitudinal) debido a las fuerzas instantáneas, $F''_{x,d}$. Véanse las expresiones (12) y (13). Para la determinación de estos desplazamientos se ha empleado un módulo de elasticidad transversal de $2G = 1,8$ MPa.

^(f) Desplazamientos de cálculo en la dirección perpendicular al eje del tablero (transversal) debido a las fuerzas instantáneas, $F''_{y,d}$. Véanse las expresiones (12) y (13). Para la determinación de estos desplazamientos se ha empleado un módulo de elasticidad transversal de $2G = 1,8$ MPa.

^(g) Desplazamiento total de cálculo. Véanse las ecuaciones (12),(13) y (14) debido a deformaciones impuestas y fuerzas instantáneas.

Como resultado del predimensionamiento, se estima que los apoyos inferiores de estribos tendrán las siguientes características:

Tabla 12 Predimensionamiento: características de los apoyos inferiores de estribos

Apoyos		Dimensiones en planta [mm]	Capas de elastómero ^(a) [mm]
Estribos: apoyos inferiores	Dos apoyos rectangulares	300 x 600	6 x 12 = 72 milímetros

^(a) Apoyos anclados; no se disponen capas externas de elastómero.

4 Dimensiones mínimas en planta del apoyo para las que el valor de T_q que permite cumplir la condición recogida en la expresión (11) es inferior al valor máximo permitido por la tabla 3 de UNE-EN 1337-3, en la que se definen las dimensiones normalizadas de los apoyos elastoméricos.

Apoyos superiores (anti-levantamiento)

- Cumplimiento de la tensión de compresión máxima en Estado Límite Último:

Se estima que la reacción máxima de compresión en los apoyos superiores (valores negativos de $F_{z,d}$ en la tabla 7) es de, aproximadamente, 800 kN. En la tabla siguiente se determina el área mínima del apoyo que permite limitar la presión de contacto a unos 20 MPa.

Tabla 13 **Estimación de las dimensiones en planta de los apoyos superiores en estribos**

$F_{z, min}$ [kN]	$\sigma_{máx}$ [MPa]	A'_{min} [mm ²]	$a^{(a)}$ (dir long) [mm]	$b^{(a)}$ (dir transv) [mm]	$A'^{(b)}$ [mm ²]	¿ $A' > A'_{min}$?
800	20	40.000	200	250	45.600	OK

^(a) Dimensiones elegidas según la tabla 3 de UNE-EN 1337-3 que define los tamaños normalizados de los apoyos.

^(b) Se ha determinado A' considerando un recubrimiento de las placas de zunchado de acero de 5 milímetros.

Un apoyo de 200 x 250 milímetros ($a \times b$) en planta cumpliría la condición de tensión de compresión máxima de 20 MPa.

- Cumplimiento de la condición de máxima deformación tangencial por desplazamientos horizontales:

Los apoyos superiores evitarán el levantamiento del tablero y permitirán el movimiento libre del tablero tanto en la dirección transversal como en la dirección longitudinal. Las únicas fuerzas horizontales que podrán actuar en estos apoyos son las fuerzas por rozamiento.

En la tabla 11 de UNE-EN 1337-2 (Apoyos estructurales. Elementos de deslizamiento) se definen varios valores para el coeficiente de rozamiento en función de la presión de contacto del apoyo.

Tabla 14 **Coeficiente de rozamiento de las láminas PTFE (tabla 11 de UNE-EN 1337-2)**

Presión de contacto, σ_p [MPa]	≤5	10	20	≥30
PTFE alveolado/recubrimiento de acero austenítico o de cromo duro	0,08	0,06	0,04	0,03 (0,025) ^(a)
PTFE alveolado/aleación de aluminio anodizado	0,12	0,09	0,06	0,045 (0,038) ^(a)

^(a) Estos valores se aplican a la resistencia al rozamiento de superficies de deslizamiento curvas.

El apartado 6.7 de UNE-EN 1337-2 indica, además, que los valores de la tabla 11 de dicha norma son válidos únicamente para PTFE alveolado y lubricado.

Para este ejemplo, las fuerzas de rozamiento se obtendrán, de forma conservadora, para la reacción vertical de 800 kN correspondiente a una combinación de ELU.

Por otra parte, se considerará un valor del coeficiente de rozamiento $\mu = 0,03$, considerando una placa PTFE alveolada con recubrimiento de acero austenítico o de cromo duro. El valor del coeficiente de rozamiento adoptado para apoyos deslizantes deberá ser siempre confirmado por el suministrador. Partiendo de las premisas indicadas, se estima una fuerza de rozamiento de 24,0 kN tanto en la dirección transversal como en la dirección longitudinal.

Tabla 15 Estimación del espesor mínimo total de elastómero, T_q , de los apoyos superiores

$F_{x,d}^{(a)}$ [kN]	$F_{y,d}^{(b)}$ [kN]	G [MPa]	$\varepsilon_{q,d} = v_{xy,d}/T_q^{(c)}$
24,0	24,0	0,9	0,75

^(a) Fuerza horizontal total en la dirección del eje del tablero (longitudinal).

^(b) Fuerza horizontal total en la dirección perpendicular al eje del tablero (transversal).

^(c) Al no haber desplazamientos introducidos por deformaciones impuestas, la relación $v_{xy,d}/T_q$ depende únicamente de la fuerza aplicada al apoyo y su dimensión en planta (véase la expresión (12)): $v_{xy,d}/T_q = (\sqrt{2} \cdot F)/(A \cdot G)$, donde $F = F_{x,d} = F_{y,d}$.

Tal como se indica en la nota^(c) de la tabla anterior, al no ser solicitados por deformaciones impuestas, el valor de la distorsión en los apoyos superiores no depende del espesor de elastómero, depende únicamente de las dimensiones en planta del apoyo y de la fuerza aplicada. Como también se puede observar en la tabla anterior, las dimensiones en planta estimadas en el punto anterior (200 x 250 milímetros) son suficientes para que, con las fuerzas obtenidas, se tenga un valor de $\varepsilon_{q,d}$ inferior a 1,0.

El espesor total del elastómero se define, así, según los tamaños normalizados de la tabla 3 de UNE-EN 1337-3; para unas dimensiones en planta de 200 x 250 milímetros, se dispone el número y espesor mínimo de las capas de elastómero permitidas por dicha tabla: tres capas de elastómero de 8 milímetros de espesor.

Comentario: En general, las fuerzas de rozamiento se obtienen para las reacciones verticales generadas por las cargas permanentes. Este criterio está pensado para apoyos que funcionan como apoyo principal (apoyos con carga bajo la hipótesis de cargas permanentes) y no para apoyos que solo trabajan de forma esporádica, como es el caso de los apoyos anti-levantamiento de este ejemplo.

Como se puede verificar en la tabla siguiente, para la hipótesis de cargas permanentes se obtienen compresiones únicamente en los apoyos inferiores y, por tanto, no hay carga en los apoyos superiores.

Tabla 16 Reacciones verticales para hipótesis de cargas permanentes

Combinación	$F_{z,d,1}^{(a) (b)}$ [kN]	$F_{z,d,2}^{(a) (b)}$ [kN]
$F_{z,d,min} (CP_{minima})$	423,6	423,6

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

^(b) $F_{z,d,1}$ fuerza vertical en apoyo 1; $F_{z,d,2}$ fuerza vertical en apoyo 2.

En este ejemplo, la reacción de levantamiento de 800 kN corresponde a una hipótesis de ELU con la sobrecarga ubicada en el centro del vano central, concomitante con viento vertical ascendente, es decir, se trata de una situación de levantamiento puntual. Si bien la obtención de las fuerzas de rozamiento para esta reacción vertical es una hipótesis muy conservadora, no condiciona a la hora de determinar las dimensiones de los apoyos.

Como resultado del predimensionamiento, se estima que los apoyos superiores (anti-levantamiento) de los estribos tendrán las siguientes características:

Tabla 17 **Predimensionamiento: características de los apoyos superiores de estribos**

Apoyos		Dimensiones en planta [mm]	Capas de elastómero ^(a) [mm]
Estribos: apoyos superiores	Dos apoyos rectangulares	200 x 250	3 x 8 = 24 milímetros

^(a) Apoyos tipo C-E. Apoyos anclados deslizantes; no se disponen capas externas de elastómero.

5

PROCESO ITERATIVO PARA LA DETERMINACIÓN DE LAS DIMENSIONES FINALES DE LOS APOYOS

Una vez estimadas unas características geométricas para los apoyos (predimensionamiento), estas se deben introducir en los modelos de cálculo para una obtención más realista de la distribución de cargas y desplazamientos horizontales en los distintos apoyos.

En la tabla siguiente se incluye un resumen de las principales características de los apoyos de estribos y pilas obtenidas en el predimensionamiento:

Tabla 18 Predimensionamiento: características de los apoyos de estribos y pilas

Apoyos		Dimensiones en planta [mm x mm]	Capas de elastómero [mm]
Pilas	Un apoyo circular	$D=900$	$2 \times 2,5 + 4 \times 20 = 85$ milímetros
Estribos: apoyos inferiores	Dos apoyos rectangulares	300 x 600	$6 \times 12 = 72$ milímetros
Estribos: apoyos superiores	Dos apoyos rectangulares	200 x 250	$3 \times 8 = 24$ milímetros

5.1 Primera iteración

Teniendo en cuenta, ahora, la rigidez de los apoyos (con las características obtenidas en el predimensionamiento) se obtiene una nueva distribución de fuerzas y desplazamientos horizontales.

Tabla 19 Iteración 1: distribución de fuerzas y desplazamientos horizontales

Distribución de fuerzas y desplazamientos horizontales		Apoyos de pilas (1 apoyo)	Apoyos inferiores de estribos (1 apoyo)
Fuerza horizontal longitudinal de frenado	$F''_{x,k}$	±126,4 kN	±80,9 kN
Fuerza horizontal longitudinal de viento ^(a)		±21,5 kN	±13,7 kN
Fuerza horizontal transversal de viento ^(a)	$F''_{y,k}$	±99,0 kN	±60,8 kN
Reológico	$V'_{x,k}$	-4,5 mm	-21,3 mm ^(b)
Acortamiento elástico del pretensado		-2,0 mm	-6,2 mm ^(b)
Contracción térmica		-4,2 mm	-13,2 mm ^(b)
Dilatación térmica		6,4 mm	20,0 mm ^(b)

^(a) Se considera el caso más desfavorable: viento concomitante con la sobrecarga sobre el tablero. Según la tabla AN.5 del Anejo Nacional de UNE-EN 1990, el coeficiente de combinación del viento con las restantes cargas variables, ψ , es 0,6 por lo que la carga del viento considerando la concomitancia con la sobrecarga siempre es superior a la carga del viento sin la concomitancia de la sobrecarga.

^(b) Todo el desplazamiento corresponderá a desplazamiento en los apoyos puesto que el estribo es infinitamente más rígido que estos.

Con esta distribución de fuerzas queda verificado el cumplimiento de todas las condiciones exigidas por la norma UNE-EN 1337-3 para para los apoyos inferiores y superiores de los estribos, pero no para los apoyos de pilas, cuyo espesor total de elastómero se ha tenido que incrementar a 105 milímetros (cinco capas de 20 milímetros + dos capas de 2,5 milímetros), manteniendo el área en planta, para cumplir con la condición de estabilidad a rotación. Además, se confirma que no es necesario anclar los apoyos de pilas.

En la tabla siguiente se incluye un resumen de las principales características de los apoyos de estribos y pilas obtenidas tras la 1ª iteración para la obtención de las fuerzas y desplazamientos horizontales.

Tabla 20 Características de los apoyos de estribos y pilas tras la 1ª iteración

Apoyos		Dimensiones en planta [mm x mm]	Capas de elastómero [mm]
Pilas	Un apoyo circular	$D=900$	$2 \times 2,5 + 5 \times 20 = 105$ milímetros
Estribos: apoyos inferiores	Dos apoyos rectangulares	300 x 600	$6 \times 12 = 72$ milímetros
Estribos: apoyos superiores	Dos apoyos rectangulares	200 x 250	$3 \times 8 = 24$ milímetros

5.2 Segunda iteración

El cambio en las dimensiones de los apoyos de pilas implica un cambio en la rigidez de la estructura y, por ende, la realización de una nueva iteración para la obtención de una nueva distribución de las fuerzas y desplazamientos horizontales.

El incremento de la altura de elastómero de los apoyos de pilas ha alterado ligeramente la distribución de las fuerzas horizontales, generando una migración de las fuerzas de las pilas a los estribos. Además, al ser el apoyo más flexible, un mayor porcentaje del desplazamiento en los ejes de pilas es acomodado por el apoyo (y no por la pila).

Tabla 21 Iteración 2: distribución de fuerzas y desplazamientos horizontales

Distribución de fuerzas y desplazamientos horizontales		Apoyos de pilas	Apoyos inferiores de estribos
Fuerza horizontal longitudinal de frenado	$F''_{x,k}$	±118,0 kN	±84,8 kN
Fuerza horizontal longitudinal de viento ^(a)		±20,1 kN	±14,4 kN
Fuerza horizontal transversal de viento ^(a)	$F''_{y,k}$	±92,9 kN	±63,8 kN
Reológico	$V'_{x,k}$	-5,0 mm	-21,3 mm ^(b)
Acortamiento elástico del pretensado		-2,1 mm	-6,2 mm ^(b)
Contracción térmica		-4,5 mm	-13,2 mm ^(b)
Dilatación térmica		6,8 mm	20,0 mm ^(b)

^(a) Se considera el caso más desfavorable: viento concomitante con la sobrecarga sobre el tablero. Según la tabla AN.5 del Anejo Nacional de UNE-EN 1990, el coeficiente de combinación del viento con las restantes cargas variables, Ψ , es 0,6 por lo que la carga del viento considerando la concomitancia con la sobrecarga siempre es superior la carga del viento sin la concomitancia de la sobrecarga.

^(b) Todo el desplazamiento corresponderá a desplazamiento en los apoyos puesto que el estribo es infinitamente más rígido que estos.

Con la nueva distribución de fuerzas se ha verificado el cumplimiento de todas las condiciones exigidas por la norma UNE-EN 1337-3 para los apoyos superiores de estribos y también para los apoyos de pilas. No obstante, con la migración de las fuerzas hacia los estribos, sus apoyos inferiores dejan de cumplir el límite de deformación tangencial por desplazamientos horizontales (es decir, no se cumple la condición $\varepsilon_{q,d} \leq 1,0$ del apartado 5.3.3.3 de UNE-EN 1337-3) por lo que es necesario incrementar su altura de elastómero.

Según la tabla 3 de UNE-EN 1337-3, la altura total máxima de elastómero de un apoyo de 300 x 600 milímetros en planta no puede superar los 72 milímetros; para poder disponer de más altura de elastómero se tienen que modificar las dimensiones en planta de los apoyos. Por lo tanto, se adoptan unos apoyos de 400 x 500 milímetros en planta (aproximadamente la misma área en planta) y siete capas de 12 milímetros (84 milímetros) de espesor de elastómero, dimensiones normalizadas y acordes con UNE-EN 1337-3.

En la tabla siguiente se incluye un resumen de las principales características de los apoyos de estribos y pilas obtenidas tras la 2ª iteración, para la obtención de la nueva distribución de fuerzas y desplazamientos horizontales.

Tabla 22 Características de los apoyos de estribos y pilas tras la 2ª iteración

Apoyos		Dimensiones en planta [mm x mm]	Capas de elastómero [mm]
Pilas	Un apoyo circular	$D=900$	$2 \times 2,5 + 5 \times 20 = 105$ milímetros
Estribos: apoyos inferiores	Dos apoyos rectangulares	400 x 500	$7 \times 12 = 84$ milímetros
Estribos: apoyos superiores	Dos apoyos rectangulares	200 x 250	$3 \times 8 = 24$ milímetros

5.3 Tercera iteración

El cambio en las dimensiones de los apoyos de estribos implica otro ligero cambio en la rigidez de la estructura y, por lo tanto, la realización de una nueva iteración para la obtención de una nueva distribución de las fuerzas y desplazamientos horizontales. El incremento de la altura de elastómero de los apoyos de estribos altera ligeramente la distribución de las fuerzas horizontales, generando una migración de las fuerzas de los estribos a las pilas.

Tabla 23 Iteración 3: distribución de fuerzas y desplazamientos horizontales

Distribución de fuerzas y desplazamientos horizontales		Apoyos de pilas	Apoyos inferiores de estribos
Fuerza horizontal longitudinal de frenado	$F''_{x,k}$	±121,5 kN	±83,1 kN
Fuerza horizontal longitudinal de viento ^(a)		±20,6 kN	±14,1 kN
Fuerza horizontal transversal de viento ^(a)	$F''_{y,k}$	±95,3 kN	±62,6 kN
Reológico	$V'_{x,k}$	-5,0 mm	-21,3 mm ^(b)
Acortamiento elástico del pretensado		-2,1 mm	-6,2 mm ^(b)
Contracción térmica		-4,5 mm	-13,2 mm ^(b)
Dilatación térmica		6,8 mm	20,0 mm ^(b)

^(a) Se considera el caso más desfavorable: viento concomitante con la sobrecarga sobre el tablero. Según la tabla AN.5 del Anejo Nacional de UNE-EN 1990, el coeficiente de combinación del viento con las restantes cargas variables, ψ , es 0,6 por lo que la carga del viento considerando la concomitancia con la sobrecarga siempre es superior a la carga del viento sin la concomitancia de la sobrecarga.

^(b) Todo el desplazamiento corresponderá a desplazamiento en los apoyos puesto que el estribo es infinitamente más rígido que estos.

Con la nueva distribución de fuerzas se ha verificado el cumplimiento de todas las condiciones exigidas por la norma UNE-EN 1337-3 para todos los apoyos de la estructura y, por tanto, ya no es necesaria ninguna iteración más.

5.4 Configuración final

Para evitar alargar demasiado el contenido de esta guía con cálculos repetitivos, en los apartados siguientes únicamente se presentan las reacciones y se realizan las comprobaciones para la configuración final de los apoyos, cuyas características permiten verificar las condiciones exigidas por UNE-EN 1337-3:

- Apoyos de pilas: estos apoyos no necesitan anclaje. Sus características geométricas serán las correspondientes a un apoyo tipo B, y se definen según la tabla 3 de UNE-EN 1337-3:
 - Apoyos circulares
 - Dimensiones en planta: 900 milímetros de diámetro
 - Número y espesor de las capas de elastómero interiores: cinco capas de 20 milímetros según la tabla 3 de UNE-EN 1337-3
 - Número y espesor de las capas de elastómero exteriores: dos capas de 2,5 milímetros
 - Número y espesor de las placas de zunchado de acero interiores: seis placas de 5 milímetros según la tabla 3 de UNE-EN 1337-3, con 5 milímetros de recubrimiento lateral
 - Número y espesor de las placas de acero exteriores: el apoyo no estará anclado, por lo que no se requieren placas exteriores de acero
 - Altura total del apoyo: 135 milímetros

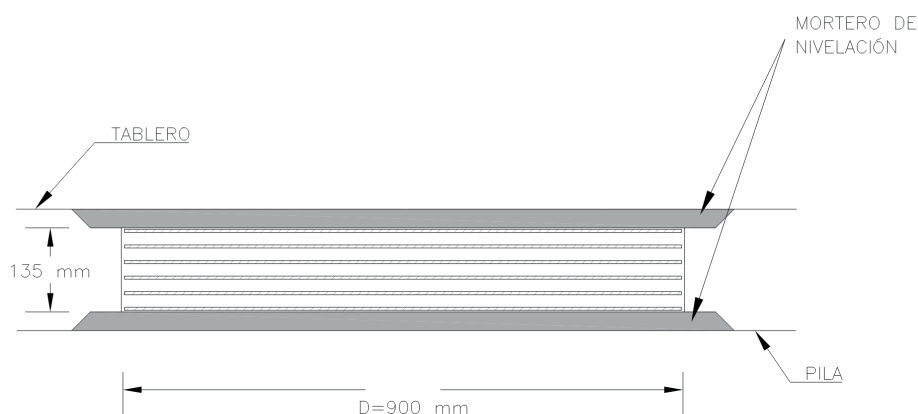


Figura 8 Esquema de apoyos de pilas (Tipo B)

Considerando, como se ha indicado anteriormente, un recubrimiento lateral de las placas de zunchado de acero de 5 milímetros, se tiene las siguientes dimensiones efectivas en planta:

$$A_I = \frac{\pi D'^2}{4} = 622.114 \text{ mm}^2 \quad (15)$$

En función de los desplazamientos a los que el apoyo se encuentre sometido en cada combinación, el área reducida en planta (A_r) de los apoyos circulares se determinará según la expresión (16) que se incluye, a fecha de redacción de esta guía, en la revisión más avanzada (a nivel de borrador, del año 2018) de la norma EN 1337-3 (de acuerdo con lo indicado en la *Guía para el cálculo de apoyos elastoméricos* [6]):

$$A_r = \frac{1}{2} \left[\frac{4 \cdot A_I}{\pi} \arcsin\left(\frac{\sqrt{D'^2 - v_{xy,d}^2}}{D'}\right) - (v_{xy,d} \sqrt{D'^2 - v_{xy,d}^2}) \right] \quad (16)$$

Por último, en la expresión (17), se determina el factor de forma, S , de las capas individuales de elastómero:

$$S = \frac{A_I}{l_p \cdot t_e} = 11,13 \text{ (para una capa de elastómero individual)} \quad (17)$$

$$l_p = \pi D' = 2796 \text{ mm} \quad (18)$$

- Apoyos inferiores de estribos: apoyos anclados al estribo con placa de extremo superior empotrada en la placa de anclaje. Sus características geométricas serán las correspondientes a un apoyo tipo C, y se definen según la tabla 3 de UNE-EN 1337-3:
 - Dimensiones en planta: 400 x 500 ($a \times b$)
 - Número y espesor de las capas de elastómero interiores: siete capas de 12 milímetros
 - Número y espesor de las capas de elastómero exteriores: 0. El apoyo estará anclado por lo que no se disponen capas de elastómero exteriores.
 - Número y espesor de las placas de zunchado de acero interiores: seis placas de 4 milímetros según la tabla 3 de UNE-EN 1337-3, con 5 milímetros de recubrimiento lateral
 - Número y espesor de las placas de acero exteriores (al tratarse de un apoyo anclado): dos placas de acero exteriores (una placa superior y otra inferior) de 18 milímetros cada una, según lo indicado en el apartado 4.4.3.2 de UNE-EN 1337-3
 - Altura total del apoyo: 144 milímetros (incluidas placas exteriores)

Comentario: dado que, para algunas de las combinaciones, se producen levantamientos en los ejes de apoyo de los estribos, se ha elegido una configuración para los apoyos inferiores que no genere tracciones en los mismos. Una configuración en la que el apoyo esté anclado tanto al estribo como al tablero generaría tensiones de tracción en el apoyo en el instante en el que se produce el levantamiento.

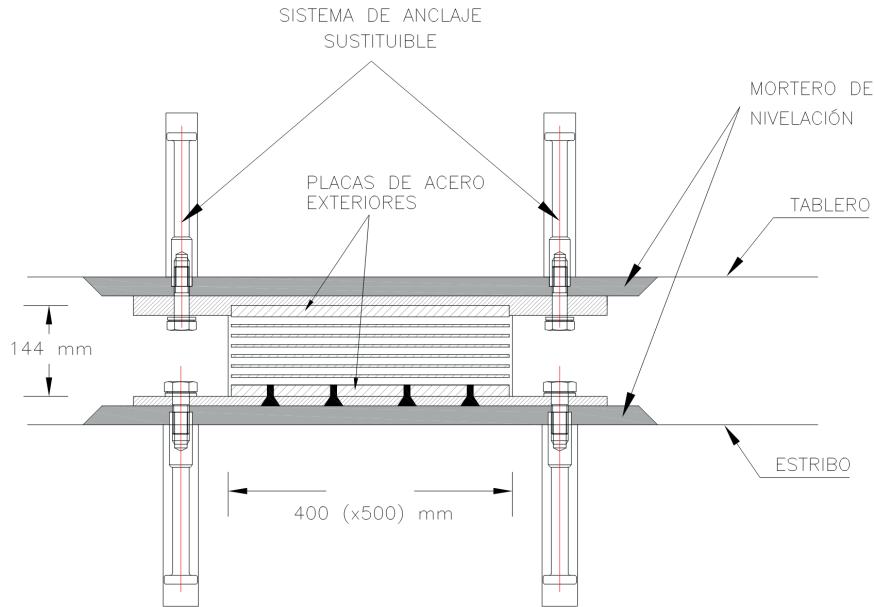


Figura 9 Esquema de apoyos inferiores de estribos

Considerando, como se ha indicado anteriormente, un recubrimiento lateral de las placas de zunchado de acero de 5 milímetros, se tiene las siguientes dimensiones efectivas en planta:

$$A_l = a' \cdot b' = 390 \cdot 490 = 191.100 \text{ mm}^2 \quad (19)$$

En función de los desplazamientos a los que el apoyo se encuentre sometido en cada combinación, el área reducida en planta del apoyo, A_r , se determinará de acuerdo con la siguiente expresión:

$$A_r = A_l \left(1 - \frac{v_{x,d}}{a'} - \frac{v_{y,d}}{b'} \right) \quad (20)$$

Por último, en la expresión (21), se determina el factor de forma, S , de las capas individuales de elastómero:

$$S = \frac{A_l}{l_p \cdot t_e} = 9,05 \text{ (para una capa de elastómero individual)} \quad (21)$$

$$l_p = 2(a' + b') = 1.760 \text{ mm} \quad (22)$$

- Apoyos superiores de estribos: estos apoyos estarán anclados en una de las caras, pero permitirán el desplazamiento libre del tablero tanto en la dirección transversal como en la longitudinal, mediante una lámina de PTFE. Las características geométricas, según la tabla 3 de UNE-EN 1337-3, serán las siguientes:
 - Dimensiones en planta: 200 x 250 ($a \times b$)
 - Número y espesor de las capas de elastómero interiores: tres capas de 8 milímetros
 - Número y espesor de las capas de elastómero exteriores: 0 capas exteriores de elastómero. El apoyo estará anclado y será del tipo C-E para permitir movimientos reversibles
 - Número y espesor de las placas de zunchado de acero interiores: dos placas de 3 milímetros según la tabla 3 de UNE-EN 1337-3, con 5 milímetros de recubrimiento lateral
 - Número y espesor de las placas de acero exteriores (al tratarse de un apoyo anclado): dos placas de acero exteriores de 15 milímetros, según lo indicado en el apartado 4.4.3.2 de UNE-EN 1337-3
 - Altura total del apoyo: 60 milímetros (incluyendo placas de acero exteriores, pero excluyendo la lámina PTFE)

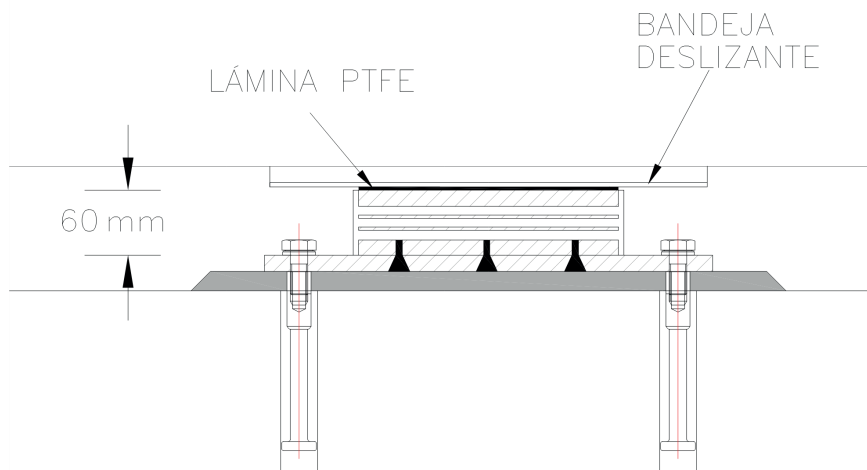


Figura 10 Esquema de apoyos anti-levantamiento (apoyos superiores)

Considerando, como se ha indicado anteriormente, un recubrimiento lateral de las placas de zunchado de acero de 5 milímetros, se tiene las dimensiones efectivas en planta:

$$A_1 = a' \cdot b' = 190 \cdot 240 = 45.600 \text{ mm}^2 \quad (23)$$

En función de los desplazamientos a los que el apoyo se encuentre sometido en cada combinación, el área reducida en planta del apoyo, A_r , se determinará de acuerdo con la expresión (20).

Por último, en la expresión (24), se determina el factor de forma, S , de las capas individuales de elastómero:

$$S = \frac{A_I}{l_p \cdot t_e} = 6,6 \text{ (para una capa de elastómero individual)} \quad (24)$$

$$l_p = 2(a' + b') = 860 \text{ mm} \quad (25)$$

Tabla 24 Resumen de la configuración final de apoyos de pilas y estribos

Apoyos		Tipo de apoyo	Dimensiones en planta ($a \times b$ o D) [mm]	Dimensiones efectivas en planta ($a' \times b'$ o D') [mm]	Capas de elastómero [mm]	Capas de elastómero exteriores [mm]	Placas de zunchado [mm]	Placas de acero exteriores [mm]	Altura total del apoyo [mm]	A_1 [mm ²]	S
Pilas	Un apoyo circular	Tipo B	900	890	Cinco capas de 20 mm $T_e = T_q = 100$ mm	Dos capas de 2,5 mm = 5 mm	Seis placas de 5 mm	-	135	622.114	11,13
Estribos: apoyos inferiores	Dos apoyos rectangulares	Tipo C	400 x 500	390 x 490	Siete capas de 12 mm $T_e = T_q = 84$ mm	- Apoyo anclado	Seis placas de 4 mm	Dos placas de 18 mm	144	191.100	9,05
Estribos: apoyos superiores	Dos apoyos rectangulares	Tipo C-E	200 x 250	190 x 240	Tres capas de 8 mm $T_e = T_q = 24$ mm	- Apoyo anclado	Dos placas de 3 mm	Dos placas de 15 mm	60	45.600	6,6

6

REACCIONES EN ESTADO LÍMITE ÚLTIMO. SITUACIÓN PERSISTENTE

Los criterios de proyecto de los apoyos elastoméricos según la norma UNE-EN 1337-3 se han detallado en la *Guía para el cálculo de apoyos elastoméricos* [6]. Como se indica en dicha guía, las comprobaciones exigidas por la norma se deberán realizar en Estado Límite Último y teniendo en cuenta, además de las fuerzas, desplazamientos y rotaciones generadas por las cargas permanentes, las generadas por las cargas variables tales como la sobrecarga vehicular, viento y variaciones de temperatura. A continuación, se incluyen las reacciones correspondientes al Estado Límite Último (situación persistente) determinadas según los Eurocódigos de bases de cálculo y acciones, UNE-EN 1990 y UNE-EN 1991, respectivamente, para los apoyos de estribos y pilas y correspondientes a las combinaciones de carga condicionantes para cada una de las verificaciones.

Para evitar alargar demasiado el contenido de esta guía con cálculos repetitivos, los valores de las reacciones incluidos en este apartado corresponden a la última iteración realizada en el capítulo 5, es decir, se han obtenido para la geometría final de los apoyos definida en el apartado 5.4.

En las tablas siguientes, se incluyen las reacciones obtenidas en Estado Límite Último para los apoyos de estribos y pilas para las hipótesis de:

- Reacción vertical máxima ($F_{z,d,máx}$)
- Reacción vertical mínima ($F_{z,d,mín}$)
- Fuerza longitudinal máxima ($F''_{x,d,máx}$)
- Fuerza transversal máxima ($F''_{y,d,máx}$)
- Desplazamiento longitudinal máximo ($v'_{x,d,máx}$)
- Desplazamiento transversal máximo ($v'_{y,d,máx}$)
- Giro longitudinal máximo ($\alpha_{a,d,máx}$)

- Giro transversal máximo ($\alpha_{b,d,máx}$)
- Reacción vertical mínima para la hipótesis de carga permanente

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 adoptar la carga permanente: carga permanente máxima a T_0 o T_∞ y carga permanente mínima a T_0 o T_∞ . Por sencillez, en este ejemplo se exponen los resultados únicamente para una de las situaciones de carga permanente (la más condicionante); no obstante, en el dimensionamiento de cualquier aparato de apoyo se deberán analizar todas las hipótesis.

Los valores de las reacciones incluidas en las tablas siguientes corresponden a un apoyo.

Tabla 25 Reacciones en apoyos de pilas (valores para 1 apoyo)

Combinación	$F_{z,d,l}^{(a)}$ [kN]	$F''_{x,d}{}^{(b)}$ [kN]	$F''_{y,d}{}^{(c)}$ [kN]	$V'_{x,d}{}^{(d)}$ [mm]	$V'_{y,d}{}^{(e)}$ [mm]	$\alpha_{a,d}{}^{(f)}$ [mrad]	$\alpha_{b,d}{}^{(g)}$ [mrad]
I $F_{z,d,máx}$ (T_∞ , SC dominante, viento concomitante)	12.871,6	0,0	85,8	8,9	0,0	2,44	5,41
II $F_{z,d,min}$ (T_∞ , SC dominante, viento concomitante)	5.153,8	0,0	85,8	2,1	0,0	1,67	1,78
III $F''_{x,d,máx}$ (T_∞ , frenado dominan- te, térmico concomi- tante)	5.558,9	164,0	0,0	13,0	0,0	1,61	0,33
IV $F''_{y,d,máx}$ (T_∞ , SC dominante, viento concomitante)	5.194,7	0,0	85,8	8,9	0,0	2,38	1,78
V $V'_{x,d,máx}$ (T_∞ , térmico dominan- te, SC concomitante)	10.921,0	0,0	0,0	15,7	0,0	0,94	2,19
VI $V'_{y,d,máx}$	No aplica						
VII $\alpha_{a,d,máx}$ (T_∞ , SC dominante, térmico concomitante)	7.611,1	0,0	0,0	10,3	0,0	5,89	2,12
VIII $\alpha_{b,d,máx}$ (T_∞ , SC dominante, viento concomitante)	7.810,0	0,0	85,8	8,9	0,0	2,62	7,88
IX $F_{z,d} (CPmin)$ (T_0)	5.811,6	0,0	0,0	2,1	0,0	0,89	0,0

^(a) Fuerza vertical: valores positivos de compresión en los apoyos inferiores; valores negativos de levantamiento.

^(b) Fuerzas instantáneas horizontales (viento, frenado, etc.) en la dirección del eje del tablero (longitudinal).

^(c) Fuerzas instantáneas horizontales (viento) en la dirección perpendicular al eje del tablero (transversal).

^(d) Desplazamientos debidos, únicamente, a deformaciones impuestas (retracción, fluencia, dilataciones/contracciones térmicas, etc.) en la dirección del eje del tablero (longitudinal).

^(e) Desplazamientos debidos, únicamente, a deformaciones impuestas (retracción, fluencia, dilataciones/contracciones térmicas, etc.) en la dirección perpendicular del eje del tablero (transversal).

^(f) Giros longitudinales.

^(g) Giros transversales.

Tabla 26 Reacciones en apoyos inferiores de estribo (valores para 1 apoyo)

Combinación		$F_{z,d,1}^{(a)}$ [kN]	$F_{z,d,2}^{(a)}$ [kN]	$F''_{x,d}{}^{(b)}$ [kN]	$F''_{y,d}{}^{(c)}$ [kN]	$V'_{x,d}{}^{(d)}$ [mm]	$V'_{y,d}{}^{(e)}$ [mm]	$\alpha_{a,d}{}^{(f)}$ [mrad]	$\alpha_{b,d}{}^{(g)}$ [mrad]
I	$F_{z,d,máx}$ (T_0 , SC dominante, viento concomitante)	2.629,6	220,4	0,0	56,3	6,2	0,0	1,27	0,0
II	$F_{z,d,máx}$ (T_∞ , SC dominante, viento concomitante)	2.609,1	200,0	0,0	56,3	35,0	0,0	1,95	0,0
III	$F_{z,d,min}$ (T_∞ , SC dominante, viento concomitante)	1.354,1	-846,0	0,0	56,3	35,0	0,0	0,04	0,0
IV	$F''_{x,d,máx}$ (T_∞ , frenado dominante, térmico concomitante)	1.696,6	716,8	112,2	0,0	46,9	0,0	1,20	0,0
V	$F''_{y,d,máx}$ (T_∞ , SC dominante, viento concomitante)	2.609,1	200,0	0,0	56,3	35,0	0,0	1,95	0,0
VI	$V'_{x,d,máx}$ (T_∞ , térmico dominante, SC concomitante)	1.726,5	746,8	0,0	0,0	54,8	0,0	0,77	0,0
VII	$V'_{y,d,máx}$	No aplica							
VIII	$\alpha_{a,d,máx}$ (T_∞ , SC dominante, térmico concomitante)	1.742,2	735,5	0,0	0,0	39,1	0,0	6,07	0,0
IX	$\alpha_{b,d,máx}$	No aplica ^(h)							
X	$F_{z,d} (CPmin)$ (T_∞)	423,6	423,6	0,0	0,0	27,5	0,0	2,15	0,0

^(a) Fuerza vertical: valores positivos de compresión en los apoyos inferiores; valores negativos de levantamiento, es decir, reacción de compresión en el apoyo superior.

^(b) Fuerzas instantáneas horizontales (viento, frenado, etc.) en la dirección del eje del tablero (longitudinal).

^(c) Fuerzas instantáneas horizontales (viento) en la dirección perpendicular al eje del tablero (transversal).

^(d) Desplazamientos debido, únicamente, a deformaciones impuestas (retracción, fluencia, dilataciones/contracciones térmicas, etc.) en la dirección del eje del tablero (longitudinal).

^(e) Desplazamientos debido, únicamente, a deformaciones impuestas (retracción, fluencia, dilataciones/contracciones térmicas, etc.) en la dirección perpendicular del eje del tablero (transversal).

^(f) Giros de eje perpendicular a la dimensión a del apoyo (en este caso, giros longitudinales).

^(g) Giros de eje perpendicular a la dimensión b del apoyo (en este caso, giros transversales).

^(h) En los ejes de estribos las torsiones se resisten mediante un par de fuerzas verticales en cada apoyo, por lo que no se producen giros transversales.

Los apoyos superiores de estribos se analizan para tres combinaciones en particular:

- máxima compresión en el apoyo anti-levantamiento (máxima reacción de levantamiento)
- máximo giro longitudinal concomitante con el levantamiento
- máximo giro longitudinal

Tal como se ha procedido en el apartado de predimensionamiento (apartado 4 de esta guía) las fuerzas de rozamiento se obtienen considerando $\mu = 3\%$.

Tabla 27 Reacciones en apoyos superiores (anti-levantamiento) de estribo

Combinación		$F_{z,d,1}^{(a)}$ [kN]	$F_{z,d,2}^{(a)}$ [kN]	$F_{x,d}^{(b)}$ [kN]	$F_{y,d}^{(c)}$ [kN]	$V_{x,d}^{(d)}$ [mm]	$V_{y,d}^{(e)}$ [mm]	$\alpha_{a,d}^{(f)}$ [mrad]	$\alpha_{b,d}^{(g)(h)}$ [mrad]
I	$F_{z,d,min}$ (Máxima reacción de levantamiento)	1.354,1	-846,0	25,4	25,4	13,5	13,5	0,04	0,0
II	$\alpha_{a,d,max}$ concomitante con levanta- miento	674	-134	4,0	4,0	2,1	2,1	3,82	0,0
III	$\alpha_{a,d,max}$	1.742,2	735,5	0,0	0,0	0,0	0,0	6,07	0,0

^(a) Fuerza vertical: valores positivos de compresión en los apoyos inferiores; valores negativos de levantamiento, es decir, reacción de compresión en el apoyo superior.

^(b) Fuerzas horizontales en la dirección del eje del tablero (longitudinal). En el caso particular de los apoyos superiores, estas fuerzas corresponden a las fuerzas de rozamiento.

^(c) Fuerzas horizontales en la dirección perpendicular al eje del tablero (transversal). En el caso particular de los apoyos superiores, estas fuerzas corresponden a las fuerzas de rozamiento.

^(d) Desplazamientos en la dirección del eje del tablero (longitudinal). En el caso particular de los apoyos superiores, estos desplazamientos son los generados por las fuerzas de rozamiento.

^(e) Desplazamientos en la dirección perpendicular al eje del tablero (transversal). En el caso particular de los apoyos superiores, estos desplazamientos son los generados por las fuerzas de rozamiento.

^(f) Giros de eje perpendicular a la dimensión a del apoyo (en este caso, giros longitudinales).

^(g) Giros de eje perpendicular a la dimensión b del apoyo (en este caso, giros transversales).

^(h) En los ejes de estribos las torsiones se resisten mediante un par de fuerzas verticales en cada apoyo, por lo que no se producen giros transversales.

Comentario: Tal como se ha indicado en el apartado dedicado al predimensionamiento de los apoyos de estribos (apartado 4.2 de esta guía), las fuerzas de rozamiento generadas en sus apoyos superiores (deslizantes) se han estimado de forma conservadora. Al repartir estas fuerzas por los apoyos de las pilas y por los apoyos inferiores de los estribos, la reacción horizontal longitudinal correspondiente a cada apoyo sería muy reducida comparada con las restantes cargas ($25 \text{ kN} \times 2 = 50 \text{ kN}^5$, a repartir entre seis apoyos, es decir, $6,25 \text{ kN}$ por apoyo). Por ello, en este ejemplo, se ha despreciado la distribución de las fuerzas de rozamiento por los apoyos de pilas y por los apoyos inferiores de los estribos; las fuerzas de rozamiento sólo se han tenido en cuenta para la verificación de los apoyos superiores de los estribos (anti-levantamiento).

5 Como se puede verificar en la tabla 26 de esta guía, los levantamientos sólo se producen en uno de los aparatos de apoyo de cada eje de apoyos. Dado que el alzado de la estructura es simétrico, en las hipótesis con levantamiento se levantaría un apoyo en cada eje de estribo.

7

COMPROBACIÓN DE APOYOS ELASTOMÉRICOS SEGÚN UNE-EN 1337-3

7.1 Breve resumen de las comprobaciones realizadas y criterios adoptados

Además de los criterios recogidos en UNE-EN 1337-3, para la comprobación de la resistencia y estabilidad de los apoyos se tendrán en cuenta los desplazamientos y giros mínimos definidos indicados en el apartado 5.5 de UNE-EN 1337-1 (véase también el apartado 5 de la *Guía para el cálculo de apoyos elastoméricos* [6]); para el análisis de rotura de los apoyos, se considerará un giro mínimo de 0,003 rad y un movimiento de translación mínimo de 10 milímetros.

7.1.1 Comprobación del límite de deformación tangencial de cálculo máxima

Según el apartado 5.3.3 de UNE-EN 1337-3, la deformación tangencial de cálculo máxima, $\varepsilon_{t,d}$, suma de las deformaciones tangenciales de cálculo debido a las cargas de compresión, a los movimientos de translación y a la rotación angular del apoyo, no debe superar el límite $\varepsilon_{u,d}$.

$$\varepsilon_{t,d} = K_L (\varepsilon_{c,d} + \varepsilon_{q,d} + \varepsilon_{\alpha,d}) \leq \varepsilon_{u,d} \quad (26)$$

donde:

$\varepsilon_{t,d}$ deformación tangencial de cálculo nominal total en el bloque de elastómero

K_L 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. En esta guía, se toma este factor igual a 1,00

$\varepsilon_{c,d}$ deformación tangencial de cálculo debida a las cargas de compresión (véase el apartado 7.1.1.1)

$\varepsilon_{q,d}$ deformación tangencial por cortante de cálculo debida a los desplazamientos horizontales (véase el apartado 7.1.1.2 de esta guía)

$\varepsilon_{\alpha,d}$ deformación tangencial de cálculo debida a la rotación angular (véase apartado 7.1.1.3 de esta guía)

$\varepsilon_{u,d}$ valor máximo de cálculo permitido para la deformación tangencial total, $\varepsilon_{t,d}$, dado por:

$$\varepsilon_{u,d} = \frac{\varepsilon_{u,k}}{\gamma_m} \quad (27)$$

donde:

$\varepsilon_{u,k}$ valor máximo característico permitido para la deformación tangencial total, tomado igual a 7 para ELU, según la cláusula 5.3.3 a) de UNE-EN 1337-3

γ_m factor parcial de seguridad para la resistencia del material elastómero. El valor recomendado por UNE-EN 1337-3 es 1,00. En este ejemplo se adopta el valor recomendado

En los apartados siguientes se incluye la determinación de cada una de las deformaciones que posteriormente se emplearán para realizar la comprobación del límite de deformación máxima indicado en el apartado 7.1.1.

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

Según el apartado 5.3.3.2 de UNE-EN 1337-3, la deformación tangencial de cálculo debido a cargas de compresión se determinará mediante la siguiente expresión:

$$\varepsilon_{c,d} = \frac{1,5 \cdot F_{z,d}}{G \cdot A_r \cdot S} \quad (28)$$

donde:

$F_{z,d}$ carga vertical de cálculo

G valor nominal del módulo de elasticidad transversal convencional del apoyo elastomérico. Para fines de cálculo, G debe ser uno de los valores definidos en la tabla 1 de UNE-EN 1337-3. En este ejemplo se adopta $G = 0,90$ MPa

S factor de forma de la capa de material elastómero analizada, determinado según el apartado 5.3.3 de UNE-EN 1337-3. Se recuerda que, de acuerdo con el mismo apar-

tado, los cálculos de Estado Límite Último no deben aplicarse a las capas externas superior e/o inferior cuando el espesor de estas sea igual o inferior a 2,5 milímetros. El factor de forma de las capas interiores de elastómero de los apoyos adoptados en este ejemplo se ha determinado en el apartado 5 de esta guía

A_r área plana efectiva reducida del apoyo debido a los efectos de la carga. A_r . Se determina teniendo en cuenta los desplazamientos producidos por las cargas horizontales concomitantes con el valor de $F_{z,d}$ de cada combinación estudiada

UNE-EN 1337-3 no define un límite para la distorsión producida por las cargas de compresión.

Para la realización de esta comprobación se debe buscar la máxima carga vertical, pero también el máximo desplazamiento horizontal concomitante. Como se podrá verificar en los apartados correspondientes a la verificación particular de cada tipo de apoyo, para la comprobación de la deformación tangencial de cálculo debido a las cargas verticales de compresión, la combinación de máxima carga vertical no siempre es la más desfavorable; en algunos casos, puede ser más desfavorable tener un poco menos de carga vertical pero más desplazamiento horizontal (es decir, menor A_r).

7.1.1.2 Deformación tangencial de cálculo por desplazamientos horizontales, $\epsilon_{q,d}$

Según el apartado 5.3.3.3 de UNE-EN 1337-3, la deformación tangencial por cortante de cálculo debido a los desplazamientos horizontales se determinará mediante la expresión (29). Esta deformación no debe exceder el valor de 1,00 en ELU.

$$\epsilon_{q,d} = \frac{v_{xy,d}}{T_q} \leq 1,00 \quad (29)$$

donde:

$v_{xy,d}$ desplazamiento máximo horizontal relativo de las partes del apoyo obtenida mediante la suma vectorial de $v_{x,d}$ y $v_{y,d}$, que son los desplazamientos en la dirección longitudinal y transversal, respectivamente

T_q espesor total de las capas de material elastómero que se deforman a cortante, incluyendo las capas exteriores superior e inferior siempre y cuando su deformación a cortante no esté restringida

Comentario: a la hora de determinar el valor de T_q , se deberá tener en cuenta, además, que en su apartado 5.3.3, UNE-EN 1337-3 indica que los cálculos de ELU no deben aplicarse a las capas externas superior e inferior cuando el espesor de estas sea igual o inferior a 2,5 milímetros.

Se deberán tener en cuenta los desplazamientos mínimos indicados en el apartado 5.5 de UNE-EN 1337-1.

7.1.1.3 Deformación tangencial de cálculo debida a la rotación angular, $\varepsilon_{\alpha,d}$

Según el apartado 5.3.3.4 de UNE-EN 1337-3, la deformación tangencial de cálculo debida a la rotación angular se determinará mediante la expresión (30):

$$\varepsilon_{\alpha,d} = \frac{(a'^2 \cdot \alpha_{a,d} + b'^2 \cdot \alpha_{b,d}) t_i}{2 \sum t_i^3} \quad (30)$$

donde:

$\alpha_{a,d}$ ángulo de rotación a lo largo de la dimensión a del apoyo, debido a los efectos de las cargas de cálculo (ELU)

$\alpha_{b,d}$ ángulo de rotación a lo largo de la dimensión b del apoyo, debido a los efectos de las cargas de cálculo (ELU)

t_i espesor de una capa individual de elastómero

a' y b' dimensiones efectivas del apoyo

UNE-EN 1337-3 no define un límite para la deformación tangencial producida por la rotación del apoyo.

Para la determinación de la deformación tangencial debida a la rotación angular en apoyos circulares se tendrá en cuenta la expresión (31), equivalente a la expresión (30), (véase la *Guía para el cálculo de apoyos elastoméricos* [6]) que se recoge en la revisión más avanzada, a fecha de redacción de esta guía, del borrador (año 2018) de la norma EN 1337-3:

$$\varepsilon_{\alpha,d} = \frac{D'^2 \cdot \alpha_d \cdot t_i}{2 \sum t_i^3} \quad (31)$$

donde:

$$\alpha_d = \sqrt{\alpha_{a,d}^2 + \alpha_{b,d}^2} \quad (32)$$

D' , $\alpha_{a,d}$, $\alpha_{b,d}$ y t_i se han definido anteriormente en esta guía

7.1.2 Espesor mínimo de las placas de zunchado de acero

Según el apartado 5.3.3.5 de UNE-EN 1337-3 el espesor mínimo de las placas de zunchado de acero se determinará mediante la siguiente expresión:

$$t_s = \frac{K_p \cdot F_{z,d} \cdot (t_1 + t_2) \cdot K_h \cdot \gamma_m}{A_r \cdot f_y} \geq 2 \text{ mm} \quad (33)$$

donde:

$F_{z,d}$ y A_r se han definido en el apartado 7.1.1.1 de esta guía

K_p factor de corrección del esfuerzo igual a 1,3

K_h factor para los esfuerzos en tracción inducidos en la placa y debe ser tomado igual a 1,0 para placas sin agujeros y 2,0 para placas con agujeros

t_1 y t_2 espesor de las capas de elastómero a cada lado de la placa de zunchado de acero

γ_m coeficiente parcial. En este ejemplo se adopta el valor recomendado: 1,00

f_y límite elástico del acero. En este ejemplo, $f_y = 235$ MPa

7.1.3 Comprobación de criterios de estabilidad

La estabilidad de los apoyos debe ser evaluada teniendo en cuenta la rotación, el pandeo y el deslizamiento. Los límites asociados a los criterios de estabilidad se recogen en el apartado 5.3.3.6 de UNE-EN 1337-3.

7.1.3.1 Comprobación de estabilidad relativa a la rotación

Según el apartado 5.3.3.6 de UNE-EN 1337-3, la estabilidad rotacional de un apoyo elastomérico se garantiza mediante el cumplimiento de la siguiente condición de no levantamiento del extremo menos cargado del apoyo:

- Apoyos rectangulares:

$$v_{z,d} - \frac{(a' \cdot \alpha_{a,d} + b' \cdot \alpha_{b,d})}{K_{r,d}} \geq 0 \quad (34)$$

- Apoyos circulares:

$$v_{z,d} - \frac{(D' \cdot \alpha_d)}{K_{r,d}} \geq 0 \quad (35)$$

donde:

a' b' D' dimensiones efectivas del apoyo

α_d rotación angular a lo largo del diámetro D de un apoyo circular

$K_{r,d}$ factor de rotación, definido en el anexo B de UNE-EN 1337-3. El anexo B (normativo) indica que $K_{r,d}$ debe ser tomado igual a 3,0

$v_{z,d}$ deformación vertical total producida en el apoyo por las cargas verticales de cálculo que generan los giros de cálculo $\alpha_{a,d}$ y $\alpha_{b,d}$. $v_{z,d}$, se determina mediante la siguiente expresión (según el apartado 5.3.3.7 de UNE-EN 1337-3):

$$v_{z,d} = \sum \frac{F_{z,d} \cdot t_i}{A'} \cdot \left(\frac{1}{5 \cdot G \cdot S_I^2} + \frac{1}{E_b} \right) \quad (36)$$

donde:

$F_{z,d}$ G t_i se han definido en apartados anteriores

A' área plana efectiva del apoyo laminado

S_I factor de forma para las capas más gruesas

E_b módulo de compresibilidad volumétrica del elastómero. Según el apartado 5.3.3.7 de UNE-EN 1337-3, $E_b = 2.000$ MPa es el valor utilizado, generalmente. En este ejemplo se toma E_b igual a 2.000 MPa

Comentario: Se deberán tener en cuenta los giros mínimos indicados en el apartado 5.5 de UNE-EN 1337-1 (véase el apartado 7.1 de esta guía).

7.1.3.2 Comprobación de estabilidad relativa a pandeo

Según el apartado 5.3.3.6 de UNE-EN 1337-3, la estabilidad a pandeo de un apoyo elastomérico se garantiza limitando la tensión de compresión en el apoyo:

$$\frac{F_{z,d}}{A_r} < \frac{2 \cdot a' \cdot G \cdot S_I}{3T_e} \quad (37)$$

donde:

$F_{z,d}$ A_r S_I a' G se han definido en apartados anteriores de esta guía

T_e espesor total de elastómero. A la hora de determinar el valor de T_e , se tendrá en cuenta que, en su apartado 5.3.3, UNE-EN 1337-3 indica que los cálculos de ELU no deben aplicarse a las capas externas superior e inferior cuando el espesor de estas sea igual o inferior a 2,5 milímetros

Para apoyos rectangulares, a' corresponde a la dimensión mínima de las placas de zunchado de acero; para apoyos circulares, a' corresponde al diámetro.

De forma análoga a lo indicado en el apartado 7.1.1.1 de esta guía, la situación pésima para la verificación de esta condición no siempre corresponde a la combinación para la que se obtiene la máxima carga vertical; en algunos casos, puede ser más desfavorable tener un poco menos carga vertical pero más desplazamiento horizontal (es decir, menor A_r).

7.1.3.3 Comprobación de estabilidad relativa al deslizamiento

Los apoyos no anclados deben cumplir la siguiente condición de no deslizamiento, según el apartado 5.3.3.6 de UNE-EN 1337-3:

$$F_{xy,d} \leq \mu_e \cdot F_{z,d,min} \quad (38)$$

donde:

$F_{xy,d}$ resultante de todas las fuerzas horizontales de cálculo

$F_{z,d,min}$ fuerza vertical mínima de cálculo, concomitante con $F_{xy,d}$

μ_e coeficiente de fricción, que viene dado por:

$$\mu_e = 0,1 + \frac{1,5 K_f}{\sigma_m} \quad (39)$$

donde:

K_f según el apartado 5.3.3.6 de UNE-EN 1337-3, este coeficiente debe ser tomado igual a 0,6 para el hormigón y 0,2 para otras superficies (incluyendo morteros de resina). Al tratarse de una estructura de hormigón, en este ejemplo se toma K_f igual a 0,6

σ_m tensión de compresión media, en MPa, correspondiente a $F_{z,d,min}$.

UNE-EN 1337-3 no especifica la forma de determinación de la tensión σ_m , necesaria para la determinación del coeficiente de rozamiento. En la revisión más avanzada, a fecha de redacción de esta guía, del borrador de la norma EN 1337-3 (año 2018), el coeficiente de rozamiento se determina considerando el área efectiva del apoyo, A_1 . En esta guía σ_m se determinará teniendo en cuenta el área efectiva del apoyo, A_1 (véase la *Guía para el cálculo de apoyos elastoméricos* [6])

Además, bajo cargas permanentes, se debe garantizar una tensión de compresión superior a 3 MPa, es decir:

$$\sigma_{cd,min} = \frac{F_{z,d,min}}{A_r} \geq 3 \text{ MPa} \quad (40)$$

Si un apoyo no cumple los requisitos para la estabilidad frente al deslizamiento, deben disponerse dispositivos que permitan transmitir las fuerzas horizontales a la subestructura (apoyos anclados).

Comentario: Se deberán tener en cuenta los desplazamientos mínimos indicados en el apartado 5.5 de UNE-EN 1337-1.

7.2 Comprobación de los apoyos de pilas

En los apartados siguientes se realiza la comprobación de los apoyos de pilas para la geometría final definida en el apartado 5.4 y las reacciones incluidas en el apartado 6.

En la tabla siguiente, se recuerdan las características de los apoyos de pilas.

Tabla 28 Resumen de la configuración final de los apoyos de pilas

Apoyos	Tipo de apoyo	Dimensiones en planta [mm]	Capas internas de elastómero [mm]	Capas de elastómero exteriores [mm]	Placas de zunchado [mm]	Placas de acero exteriores [mm]	Altura total del apoyo [mm]	A_I [mm ²]	S
Pilas 1 apoyo circular	Tipo B	$D=900$ $D'=890$	5 capas de 20 mm $T_e = T_q = 100$ mm ⁽¹⁾	2 capas de 2,5 mm = 5 mm ⁽¹⁾	6 placas de 5 mm	-	135	622.114	11,13

⁽¹⁾ En su apartado 5.3.3, UNE-EN 1337-3 indica que los cálculos de ELU no deben aplicarse a las capas externas superior e inferior cuando el espesor de estas sea igual o inferior a 2,5 milímetros.

7.2.1 Deformación tangencial de cálculo debida a la carga de compresión, $\epsilon_{c,d}$

En la tabla siguiente se determina la deformación tangencial debida a las cargas de compresión en los apoyos de pilas para las distintas combinaciones estudiadas:

Tabla 29 Determinación de la deformación tangencial de cálculo debida a la carga de compresión, $\epsilon_{c,d}$, en los apoyos de pilas

Deformación tangencial de cálculo debida a la carga de compresión, $\epsilon_{c,d}$							
Apoyo	Combinación	$F_{z,d}$ [kN]	$V_{x,d}$ ^{(a) (b) (e)} [mm]	$V_{y,d}$ ^{(a) (b) (e)} [mm]	A_r ^(c) [mm ²]	$\epsilon_{c,d}$	$\sigma_{c,d}$ ^(d) [MPa]
Pilas 900 x 100	I	12.871,6	10,0	10,0	609.528	3,16	21,12
	II	5.153,8	10,0	10,0	609.528	1,27	8,46
	III	5.558,9	27,3	10,0	596.258	1,40	9,32
	IV	5.194,7	10,0	10,0	609.528	1,28	8,52
	V	10.921,0	15,7	10,0	605.577	2,70	18,03
	VI	No aplica					
	VII	7.611,1	10,3	10,0	609.320	1,87	12,49

Continuación							
Deformación tangencial de cálculo debida a la carga de compresión, $\varepsilon_{c,d}$							
Apoyo	Combinación	$F_{z,d}$ [kN]	$v_{x,d}^{(a)(b)(e)}$ [mm]	$v_{y,d}^{(a)(b)(e)}$ [mm]	$A_r^{(c)}$ [mm ²]	$\varepsilon_{c,d}$	$\sigma_{c,d}^{(d)}$ [MPa]
Pilas 900 x 100	VIII	7.810,0	10,0	10,0	609.528	1,92	12,81
	IX	5.811,6	10,0	10,0	609.528	1,43	9,53

^(a) Véanse las expresiones (12), (13) y (14) de esta guía para la obtención de $v_{x,d}$ y $v_{y,d}$ donde:

$v_{x,d} = v'_{x,d} + v''_{x,d}$ es el desplazamiento horizontal en la dirección del eje del tablero (longitudinal) generado por las deformaciones impuestas y las fuerzas instantáneas

$v_{y,d} = v'_{y,d} + v''_{y,d}$ desplazamiento horizontal en la dirección perpendicular al eje del tablero (transversal) generado por las deformaciones impuestas y las fuerzas instantáneas

^(b) Se han tenido en cuenta los desplazamientos mínimos indicados en el apartado 5.5 de UNE-EN 1337-1.

^(c) Véase la expresión (16) de esta guía.

^(d) $\sigma_{c,d} = F_{z,d}/A_r$

^(e) Véase el apartado 3.4 de esta guía.

Se destaca en negrita la combinación pésima para la determinación de la deformación tangencial debida a las cargas de compresión en los apoyos inferiores, la combinación I, que corresponde a la combinación de máxima carga vertical de compresión. Analizando la columna correspondiente a $\sigma_{c,d}$, se verifica que se cumple el criterio adoptado en el predimensionamiento (véase el apartado 4 de esta guía) de limitar la presión de contacto en los apoyos a 20-25 MPa en ELU.

A continuación, se desarrollan los cálculos que llevan a la obtención de los valores recogidos en la tabla anterior para el caso de la combinación pésima.

La deformación tangencial debida a cargas de compresión se determina mediante la ecuación (28), y depende del área reducida en planta de los apoyos. El área reducida en planta, A_r , para apoyos circulares se calcula con la ecuación (16), y depende del desplazamiento horizontal.

El desplazamiento horizontal de cálculo, $v_{xy,d}$, se compone de:

- Desplazamiento longitudinal, $v_{x,d}$. Como refleja la ecuación (13), se obtiene como la suma de los desplazamientos generados por las deformaciones impuestas y los generados por las fuerzas instantáneas.
 - El desplazamiento generado por las deformaciones impuestas se obtiene de la tabla 25:

$$v'_{x,d} = 8,9 \text{ mm} \quad (41)$$

- El desplazamiento generado por las fuerzas instantáneas se calcula de acuerdo con la ecuación (12), donde la fuerza horizontal longitudinal, $F''_{x,d}$, se obtiene de la tabla 25:

$$v''_{x,d} = \frac{F''_{x,d} \cdot T_q}{G \cdot A} = \frac{0 \cdot 100}{(2 \cdot 0,9) \cdot \left(\frac{\pi \cdot 900^2}{4}\right)} = 0 \text{ mm} \quad (42)$$

Como se indica en el apartado 3.4 de esta guía, al tratarse de fuerzas instantáneas, se ha adoptado un valor del módulo de elasticidad transversal igual a dos veces el módulo de elasticidad transversal para deformaciones lentas.

Con los valores indicados en los puntos anteriores se obtiene el desplazamiento longitudinal, teniendo en cuenta además los desplazamientos mínimos indicados en el apartado 5.5 de UNE-EN 1337-1:

$$v_{x,d} = v'_{x,d} + v''_{x,d} = 8,9 \text{ mm} < v_{min} = 10 \text{ mm} \rightarrow v_{x,d} = 10 \text{ mm} \quad (43)$$

- Desplazamiento transversal, $v_{y,d}$. Se obtiene de forma análoga al desplazamiento longitudinal.

- Desplazamiento generado por las deformaciones impuestas, obtenido de la tabla 25:

$$v'_{y,d} = 0 \text{ mm} \quad (44)$$

- Desplazamiento generado por las fuerzas instantáneas, donde $F''_{x,d}$ se obtiene de la tabla 25:

$$v''_{y,d} = \frac{F''_{y,d} \cdot T_q}{G \cdot A} = \frac{(85,8 \cdot 10^3) \cdot 100}{(2 \cdot 0,9) \cdot \left(\frac{\pi \cdot 900^2}{4}\right)} = 7,5 \text{ mm} \quad (45)$$

Con ello se obtiene el desplazamiento transversal:

$$v_{y,d} = v'_{y,d} + v''_{y,d} = 7,5 \text{ mm} < v_{min} = 10 \text{ mm} \rightarrow v_{y,d} = 10 \text{ mm} \quad (46)$$

A partir de ambos desplazamientos se obtiene el desplazamiento horizontal de cálculo, aplicando la ecuación (14):

$$v_{xy,d} = \sqrt{v_{x,d}^2 + v_{y,d}^2} = \sqrt{10^2 + 10^2} = 14,14 \text{ mm} \quad (47)$$

El área reducida en planta resulta:

$$\begin{aligned} A_r &= \frac{1}{2} \left[\frac{4 \cdot A_l}{\pi} \arcsin\left(\frac{\sqrt{D'^2 - v_{xy,d}^2}}{D'}\right) - (v_{xy,d} \sqrt{D'^2 - v_{xy,d}^2}) \right] \\ &= \frac{1}{2} \left[\frac{4 \cdot 622.114}{\pi} \arcsin\left(\frac{\sqrt{890^2 - 14,14^2}}{890}\right) - (14,14 \sqrt{890^2 - 14,14^2}) \right] \\ &= 609.528 \text{ mm}^2 \end{aligned} \quad (48)$$

Finalmente, la deformación tangencial debida a cargas de compresión:

$$\varepsilon_{c,d} = \frac{1,5 \cdot F_{z,d}}{G \cdot A_r \cdot S} = \frac{1,5 \cdot 12.871,6 \cdot 10^3}{0,9 \cdot 609.528 \cdot 11,13} = 3,16 \quad (49)$$

A modo de control, se calcula también la presión media de compresión:

$$\sigma_{c,d} = \frac{F_{z,d}}{A_r} = \frac{12.871,6 \cdot 10^3}{609.528} = 21,1 \text{ MPa} \quad (50)$$

7.2.2 Deformación tangencial de cálculo por desplazamientos horizontales, $\varepsilon_{q,d}$

En la tabla siguiente se determina la deformación tangencial por desplazamientos horizontales para las distintas combinaciones estudiadas:

Tabla 30 Determinación de la deformación tangencial de cálculo por desplazamientos horizontales de cálculo, $\varepsilon_{q,d}$, en los apoyos de pilas

Deformación tangencial de cálculo por desplazamientos horizontales, $\varepsilon_{q,d}$							
Apoyo	Combinación	$V_{x,d}$ ^{(a) (b) (c)} [mm]	$V_{y,d}$ ^{(a) (b) (c)} [mm]	$V_{xy,d}$ [mm]	$\varepsilon_{q,d}$	$\dot{\varepsilon}_{q,d}$ <1,0?	
Pilas 900 x 100	I	10,0	10,0	14,1	0,14	OK	
	II	10,0	10,0	14,1	0,14	OK	
	III	27,3	10,0	29,1	0,29	OK	
	IV	10,0	10,0	14,1	0,14	OK	
	V	15,7	10,0	18,6	0,19	OK	
	VI	No aplica					
	VII	10,3	10,0	14,4	0,14	OK	
	VIII	10,0	10,0	14,1	0,14	OK	
	IX	10,0	10,0	14,1	0,14	OK	

^(a) Véanse las expresiones (12), (13) y (14) de esta guía para la obtención de $v_{x,d}$ y $v_{y,d}$ donde:

$v_{x,d} = v'_{x,d} + v''_{x,d}$ es el desplazamiento horizontal en la dirección del eje del tablero (longitudinal) generado por las deformaciones impuestas y las fuerzas instantáneas

$v_{y,d} = v'_{y,d} + v''_{y,d}$ desplazamiento horizontal en la dirección perpendicular al eje del tablero (transversal) generado por las deformaciones impuestas y las fuerzas instantáneas

^(b) Se han tenido en cuenta los desplazamientos mínimos indicados en el apartado 5.5 de UNE-EN 1337-1.

^(c) Véase el apartado 3.4 de esta guía.

Se destaca en negrita la combinación pésima para la determinación y comprobación de la deformación tangencial por desplazamientos horizontales de cálculo en los apoyos inferiores, la combinación III, que corresponde a la de máxima fuerza longitudinal. Como se puede observar en la tabla anterior, todos los valores de la deformación obtenidos son inferiores a 1,0, por lo que el apoyo cumple con esta condición.

A continuación, se desarrollan los cálculos que llevan a la obtención de los valores recogidos en la tabla anterior para el caso de la combinación pésima.

La deformación tangencial por desplazamientos horizontales se determina mediante la ecuación (29), y depende del desplazamiento horizontal. El desplazamiento horizontal de cálculo, $v_{xy,d}$, se obtiene de la misma manera que se ha indicado previamente en el apartado 7.2.1 para la deformación tangencial debida a la carga de compresión:

- Desplazamiento longitudinal, $v_{x,d}$:
 - Desplazamiento generado por las deformaciones impuestas, obtenido de la tabla 25:

$$v'_{x,d} = 13 \text{ mm} \quad (51)$$

- Desplazamiento generado por las fuerzas instantáneas, donde $F''_{x,d}$ se obtiene de la tabla 25:

$$v''_{x,d} = \frac{F''_{x,d} \cdot T_q}{G \cdot A} = \frac{(164 \cdot 10^3) \cdot 100}{(2 \cdot 0,9) \cdot \left(\frac{\pi \cdot 900^2}{4}\right)} = 14,32 \text{ mm} \quad (52)$$

Con ello se obtiene el desplazamiento longitudinal, teniendo en cuenta, además, los desplazamientos mínimos:

$$v_{x,d} = v'_{x,d} + v''_{x,d} = 27,32 \text{ mm} > v_{min} = 10 \text{ mm} \quad (53)$$

- Desplazamiento transversal, $v_{y,d}$:
 - Desplazamiento generado por las deformaciones impuestas, obtenido de la tabla 25:

$$v'_{y,d} = 0 \text{ mm} \quad (54)$$

- Desplazamiento generado por las fuerzas instantáneas, donde $F''_{y,d}$ se obtiene de la tabla 25:

$$v''_{y,d} = \frac{F''_{y,d} \cdot T_q}{G \cdot A} = \frac{0 \cdot (5 \cdot 20)}{(2 \cdot 0,9) \cdot \left(\frac{\pi \cdot 900^2}{4}\right)} = 0 \text{ mm} \quad (55)$$

Con ello se obtiene el desplazamiento transversal:

$$v_{y,d} = v'_{y,d} + v''_{y,d} = 0 \text{ mm} < v_{min} = 10 \text{ mm} \rightarrow v_{y,d} = 10 \text{ mm} \quad (56)$$

A partir de ambos desplazamientos se obtiene el desplazamiento horizontal de cálculo, aplicando la ecuación (14):

$$v_{xy,d} = \sqrt{v_{x,d}^2 + v_{y,d}^2} = \sqrt{27,32^2 + 10^2} = 29,09 \text{ mm} \quad (57)$$

Finalmente, la deformación tangencial por desplazamientos horizontales es:

$$\epsilon_{q,d} = \frac{v_{xy,d}}{T_q} = \frac{29,09}{5 \cdot 20} = 0,29 < 1,0 \text{ OK} \quad (58)$$

7.2.3 Deformación tangencial de cálculo debida a la rotación angular, $\varepsilon_{\alpha,d}$

En la tabla siguiente se determina la deformación tangencial debida a la rotación angular para las distintas combinaciones estudiadas.

Tabla 31 Determinación de la deformación tangencial de cálculo debida a la rotación angular, $\varepsilon_{\alpha,d}$, en los apoyos de pilas

Deformación tangencial de cálculo debida a la rotación angular, $\varepsilon_{\alpha,d}$					
Apoyo	Combinación	$\alpha_{a,d}^{(a)}$ [rad]	$\alpha_{b,d}^{(a)}$ [rad]	$\varepsilon_{\alpha,d}^{(b)}$	
Pilas 900 x 100	I	0,0030	0,0054	1,22	
	II	0,0030	0,0030	0,84	
	III	0,0030	0,0030	0,84	
	IV	0,0030	0,0030	0,84	
	V	0,0030	0,0030	0,84	
	VI	No aplica			
	VII	0,0059	0,0030	1,31	
	VIII	0,0030	0,0079	1,67	
	IX	0,0030	0,0030	0,84	

^(a) Se han tenido en cuenta los giros mínimos indicados en el apartado 5.5 de UNE-EN 1337-1.

^(b) Determinado según lo indicado en el apartado 7.1.1.3.

Se destaca en negrita la combinación pésima para la determinación de la deformación tangencial debida a la rotación angular en los apoyos inferiores, la combinación VIII, que corresponde a la de máximo giro transversal.

A continuación, se desarrollan los cálculos que llevan a la obtención de los valores recogidos en la tabla anterior para el caso de la combinación pésima. Para apoyos circulares, la deformación tangencial debida a la rotación angular se determina mediante la ecuación (31), y depende de la rotación angular a lo largo del diámetro del apoyo.

La rotación angular de cálculo a lo largo del diámetro, α_d , se determina a partir de las rotaciones en cada dirección, $\alpha_{a,d}$ y $\alpha_{b,d}$, mediante la ecuación (32):

$$\alpha_d = \sqrt{\alpha_{a,d}^2 + \alpha_{b,d}^2} = \sqrt{\max(2,62 \text{ mrad}; 3 \text{ mrad})^2 + \max(7,9 \text{ mrad}; 3 \text{ mrad})^2} = 8,45 \text{ mrad} \quad (59)$$

Con lo que la deformación tangencial debida a la rotación angular resulta:

$$\varepsilon_{\alpha,d} = \frac{D^2 \cdot \alpha_d \cdot t_i}{2 \sum t_i^3} = \frac{890^2 \cdot 0,00845 \cdot 20}{2 \cdot (5 \cdot 20^3)} = 1,67 \quad (60)$$

7.2.4 Comprobación del límite de deformación tangencial de cálculo máxima

La deformación tangencial de cálculo máxima se obtiene, de acuerdo con la ecuación (26), como suma de las deformaciones tangenciales por carga de compresión, desplazamientos horizontales y rotación angular calculadas en los apartados previos.

Tabla 32 Determinación y comprobación de la deformación tangencial de cálculo máxima, $\varepsilon_{t,d}$, en los apoyos de pilas

Deformación tangencial de cálculo máxima, $\varepsilon_{t,d}$							
Apoyo	Combinación	$\varepsilon_{c,d}$	$\varepsilon_{q,d}$	$\varepsilon_{\alpha,d}$	$\varepsilon_{t,d}$	$\varepsilon_{t,d} < 7,0?$	
Pilas 900 x 100	I	3,16	0,14	1,22	4,53	OK	
	II	1,27	0,14	0,84	2,25	OK	
	III	1,40	0,29	0,84	2,53	OK	
	IV	1,28	0,14	0,84	2,26	OK	
	V	2,70	0,19	0,84	3,73	OK	
	VI	No aplica					
	VII	1,87	0,14	1,31	3,32	OK	
	VIII	1,92	0,14	1,67	3,73	OK	
	IX	1,43	0,14	0,84	2,41	OK	

En la tabla anterior se han destacado en negrita las combinaciones condicionantes para la determinación de los tres tipos de deformación tangencial que permiten determinar la deformación tangencial de cálculo máxima, $\varepsilon_{t,d}$. Como se puede observar, el valor máximo de $\varepsilon_{t,d}$ se obtiene para la combinación I y no supera el límite de $\varepsilon_{u,d} = \varepsilon_{u,k} / \gamma_m = 7,0/1,0 = 7,0$ por lo que el apoyo cumple.

7.2.5 Espesor mínimo de las placas de zunchado de acero

La hipótesis más desfavorable para esta comprobación es la correspondiente a la máxima relación $F_{z,d} / A_r$, que se obtiene para la combinación I.

Tabla 33 Espesor mínimo de las placas de zunchado de acero de los apoyos de pilas

Espesor mínimo de las placas de zunchado de acero, t_s						
Apoyo	Combinación	$F_{z,d}$ [kN]	$V_{x,d}$ ^{(a) (b) (d)} [mm]	$V_{y,d}$ ^{(a) (b) (d)} [mm]	A_r ^(c) [mm ²]	$t_{s,min}$ [mm]
Pilas 900 x 100	I	12.871,6	10,0	10,0	609.528	4,7

^(a) Véanse las expresiones (12), (13) y (14) de esta guía para la obtención de $V_{x,d}$ y $V_{y,d}$ donde:

$v_{x,d} = v'_{x,d} + v''_{x,d}$ es el desplazamiento horizontal en la dirección del eje del tablero (longitudinal) generado por las deformaciones impuestas y las fuerzas instantáneas

$v_{y,d} = v'_{y,d} + v''_{y,d}$ desplazamiento horizontal en la dirección perpendicular al eje del tablero (transversal) generado por las deformaciones impuestas y las fuerzas instantáneas

^(b) Se han tenido en cuenta los desplazamientos mínimos indicados en el apartado 5.5 de UNE-EN 1337-1.

^(c) Véase la expresión (16) de esta guía.

^(d) Véase el apartado 3.4 de esta guía.

Tal como se ha indicado en el apartado 5.4 de esta guía, las placas de zunchado de acero interiores serán de 5 milímetros de espesor, según la tabla 3 de UNE-EN 1337-3, que cumple con la condición $t_s \geq 4,7$ milímetros.

A continuación, se desarrollan los cálculos que llevan a la obtención de los valores recogidos en la tabla anterior.

El espesor mínimo de las placas de zunchado de acero se determina con la ecuación (33), y depende del área reducida en planta de los apoyos. El cálculo del área reducida en planta de los apoyos, A_r , para los desplazamientos horizontales de la combinación I se ha detallado en el apartado 7.2.1, obteniéndose el valor $A_r = 609.528 \text{ mm}^2$.

El espesor mínimo de las placas de zunchado resulta:

$$t_s = \frac{K_p \cdot F_{z,d} \cdot (t_1 + t_2) \cdot K_h \cdot \gamma_m}{A_r \cdot f_y} \quad (61)$$

$$= \frac{1,3 \cdot (12.871,6 \cdot 10^3) \cdot (20 + 20) \cdot 1,0 \cdot 1,0}{609.528 \cdot 235} = 4,7 \text{ mm} \geq 2 \text{ mm}$$

7.2.6 Comprobación de estabilidad relativa a la rotación

Con esta comprobación se pretende garantizar que no hay pérdida de contacto entre tablero y apoyo debido a los giros. En la tabla siguiente se realiza la comprobación de la condición límite de rotación para las distintas combinaciones estudiadas.

Tabla 34 Comprobación de la condición límite de rotación en los apoyos de pilas

Condición límite de rotación									
Apoyo	Combinación	$F_{z,d}$ [kN]	$\alpha_{a,d}^{(a)}$ [rad]	$\alpha_{b,d}^{(a)}$ [rad]	α_d [rad]	$V_{z,d}$ [mm]	$V_{\alpha,d}$ [mm]	$\delta V_{z,d} > V_{\alpha,d}?$	
Pilas 900 x 100	I	12.871,6	0,0030	0,0054	0,0062	4,75	1,83	OK	
	II	5.153,8	0,0030	0,0030	0,0042	1,90	1,26	OK	
	III	5.558,9	0,0030	0,0030	0,0042	2,05	1,26	OK	
	IV	5.194,7	0,0030	0,0030	0,0042	1,92	1,26	OK	
	V	10.921,0	0,0030	0,0030	0,0042	4,03	1,26	OK	
	VI	No aplica							
	VII	7.611,1	0,0059	0,0030	0,0066	2,81	1,96	OK	
	VIII	7.810,0	0,0030	0,0079	0,0084	2,88	2,50	OK	
	IX	5.811,6	0,0030	0,0030	0,0042	2,14	1,26	OK	

^(a) Se han tenido en cuenta los giros mínimos indicados en el apartado 5.5 de UNE-EN 1337-1.

En la tabla anterior, se ha destacado en negrita la hipótesis más desfavorable para esta verificación, la combinación VIII, que corresponde a la hipótesis de máximo giro transversal; esta es la combinación en la que las deformaciones generadas por los giros se acercan más a las generadas por las cargas verticales concomitantes.

A continuación, se desarrollan los cálculos que llevan a la obtención de los valores recogidos en la tabla anterior para el caso de la combinación pésima. La estabilidad relativa a la rotación de apoyos circulares se garantiza mediante el cumplimiento de la condición de la ecuación (35). La comprobación depende de la deformación vertical total y de la rotación angular a lo largo del diámetro del apoyo.

La deformación vertical total de cálculo producida en el apoyo se obtiene con la ecuación (36), donde, para los apoyos de este ejemplo, $A' = A_I$ al tratarse de un apoyo sin agujeros y $S_I = S$ ya que todas las capas de elastómero interiores el mismo espesor:

$$v_{z,d} = \sum \frac{F_{z,d} \cdot t_i}{A'} \cdot \left(\frac{1}{5 \cdot G \cdot S_I^2} + \frac{1}{E_b} \right) \quad (62)$$

$$= 5 \cdot \frac{7.810 \cdot 10^3 \cdot 20}{622.113} \cdot \left(\frac{1}{5 \cdot 0,9 \cdot 11,13^2} + \frac{1}{2.000} \right) = 2,88 \text{ mm}$$

El cálculo de la rotación angular de cálculo para la combinación VIII a lo largo del diámetro, α_d , se ha detallado en el apartado 7.2.3, obteniéndose el valor $\alpha_d = 8,45$ mrad.

Con ello se verifica que se cumple la condición de estabilidad relativa a la rotación:

$$v_{z,d} - \frac{(D' \cdot \alpha_d)}{K_{r,d}} \geq 0 \quad (63)$$

$$2,88 - \frac{(890 \cdot 0,0845)}{3} = 2,88 \text{ mm} - 2,50 \text{ mm} = 0,38 \text{ mm} \geq 0$$

7.2.7 Comprobación de estabilidad relativa a pandeo

En la tabla siguiente se verifica el cumplimiento de la estabilidad relativa a pandeo establecida por UNE-EN 1337-3 para los apoyos de pilas:

Tabla 35 Comprobación de estabilidad relativa a pandeo en los apoyos de pilas

Estabilidad relativa a pandeo						
Apoyo	Combinación	$F_{z,d}$ [kN]	$A_r^{(a)}$ [m ²]	$F_{z,d}/A_r$ [MPa]	$\sigma_{lim,d}$ [MPa]	$\frac{F_{z,d}}{A_r} < \sigma_{lim,d}?$
Pilas 900 x 100	I	12.871,6	609.528	21,1	59,4	OK
	II	5.153,8	609.528	8,5		OK
	III	5.558,9	596.258	9,3		OK
	IV	5.194,7	609.528	8,5		OK
	V	10.921,0	605.577	18,0		OK
	VI	No aplica				
	VII	7.611,1	609.320	12,5	59,4	OK
	VIII	7.810,0	609.528	12,8		OK
	IX	5.811,6	609.528	9,5		OK

^(a) Véase la expresión (16) de esta guía.

Se destaca en negrita la combinación pésima para la verificación de la condición de estabilidad relativa a pandeo en los apoyos inferiores, la combinación I, que corresponde a la combinación de máxima carga vertical de compresión. Como se puede observar, los valores de la presión de contacto para las combinaciones de carga analizadas son inferiores al límite definido por UNE-EN 1337-3, por lo que los apoyos cumplen.

A continuación, se desarrollan los cálculos que llevan a la obtención de los valores recogidos en la tabla anterior para el caso de la combinación pésima. La estabilidad relativa a pandeo se garantiza mediante el cumplimiento de la condición de la ecuación (37). La comprobación depende del área reducida en planta de los apoyos. Además, para los apoyos de este ejemplo, $S_I = S$, ya que todas las capas de elastómero interiores tienen el mismo espesor.

El cálculo del área reducida en planta de los apoyos, A_r , para los desplazamientos horizontales de la combinación I se ha detallado en el apartado 7.2.1, obteniéndose el valor $A_r = 609\,528\text{ mm}^2$.

Con ello se verifica que se cumple la condición de estabilidad relativa a pandeo:

$$\frac{F_{z,d}}{A_r} < \frac{2 \cdot a' \cdot G \cdot S_I}{3T_e} \quad (64)$$

$$\frac{12.871,6 \cdot 10^3}{609.528} = 21,1 < 59,4 = \frac{2 \cdot 890 \cdot 0,9 \cdot 11,13}{3 \cdot 100}$$

7.2.8 Comprobación de estabilidad relativa al deslizamiento

Esta comprobación tiene como objetivo evitar el reptado de los apoyos. Por un lado, se verifica que las fuerzas horizontales no son superiores a las fuerzas de rozamiento generadas por las cargas verticales concomitantes y, por otro, se verifica que bajo la hipótesis de cargas permanentes se consigue una presión de contacto en los apoyos superior a 3 MPa.

Tabla 36 Comprobación de la condición de no deslizamiento en los apoyos de pilas

Condición de no deslizamiento							
Apoyo	Combinación	$F_{z,d}$ [kN]	$\mu_e^{(a)}$	$F_{xy,d}^{(b)}$ [kN]	$\mu_e F_{z,d}$ [kN]	$\frac{F_{xy,d}}{\mu_e \cdot F_{z,d}} \leq 1?$	
Pilas 900 x 100	I	12.871,6	0,143	103,1	1.847,1	OK	
	II	5.153,8	0,209	103,1	1.075,3	OK	
	III	5.558,9	0,201	245,0	1.115,8	OK	
	IV	5.194,7	0,208	103,1	1.079,4	OK	
	V	10.921,0	0,151	106,4	1.652,0	OK	
	VI	No aplica					
	VII	7.611,1	0,174	82,3	1.321,0	OK	
	VIII	7.810,0	0,172	103,1	1.340,9	OK	
	IX	5.811,6	0,196	81,0	1.141,1	OK	

^(a) Determinado como se indica en el apartado 7.1.3.3 de esta guía.

^(b) Se han tenido en cuenta los desplazamientos mínimos indicados en el apartado 5.5 de UNE-EN 1337-1.

En negrita se destaca la hipótesis más desfavorable para esta comprobación, la combinación III, que corresponde a la combinación de máxima fuerza longitudinal. Como se puede verificar, en ninguno de los casos estudiados las fuerzas horizontales superan las fuerzas de rozamiento concomitantes.

Además, se verifica que se cumple con la presión de contacto mínima de 3 MPa en la hipótesis de carga permanente mínima: para $F_{z,CPmin} = 5.811,6$ kN y $v_{x,d} = 10$ milímetros y $v_{y,d} = 10$ milímetros ($A_r = 609.528$ mm²) se obtiene una presión de contacto de 9,5 MPa > 3 MPa.

Con el cumplimiento de las dos condiciones, no es necesario anclar estos apoyos.

A continuación, se desarrollan los cálculos que llevan a la obtención de los valores recogidos en la tabla anterior para el caso de la combinación pésima. La estabilidad relativa al deslizamiento se garantiza mediante el cumplimiento de la condición de la ecuación (38). La comprobación depende del coeficiente de fricción y de la resultante de las fuerzas horizontales.

El coeficiente de fricción, μ_e , se calcula con la ecuación (39) y depende de la tensión de compresión media correspondiente a $F_{z,d min}$:

$$\mu_e = 0,1 + \frac{1,5 K_f}{\sigma_m} = 0,1 + \frac{1,5 K_f}{F_{z,d min}} = 0,1 + \frac{1,5 \cdot 0,6}{5.558,9 \cdot 10^3} = 0,20072 \quad (65)$$

La resultante de las fuerzas horizontales de cálculo, $F_{xy,d}$, se compone de:

- Fuerza longitudinal, $F_{x,d}$. De forma análoga a como refleja la ecuación (13) para los desplazamientos, la fuerza horizontal se obtiene como la suma de las fuerzas generadas por las deformaciones impuestas y las fuerzas instantáneas.
 - La fuerza generada por las deformaciones impuestas se calcula a partir del desplazamiento impuesto, $v'_{x,d}$, recogido en la tabla 25:

$$F'_{x,d} = \frac{v'_{x,d} \cdot G \cdot A}{T_q} = \frac{13 \cdot 0,9 \cdot \left(\frac{\pi \cdot 900^2}{4}\right)}{100} = 74.432 \text{ N} = 74,4 \text{ kN} \quad (66)$$

Al tratarse de deformaciones lentas, el módulo de elasticidad transversal del apoyo no se multiplica por 2.

- La fuerza instantánea se obtiene de la tabla 25:

$$F''_{x,d} = 164 \text{ kN} \quad (67)$$

- Además, se debe verificar que la fuerza longitudinal total ($F'_{x,d} + F''_{x,d}$) es mayor que la fuerza producida por el desplazamiento mínimo de 10 mm:

$$F_{min} = \frac{v_{min} \cdot G \cdot A}{T_q} = \frac{10 \cdot 0,9 \cdot \left(\frac{\pi \cdot 900^2}{4}\right)}{100} = 57.255 \text{ N} = 57,2 \text{ kN} \quad (68)$$

Con ello se obtiene la fuerza horizontal longitudinal:

$$F_{x,d} = F'_{x,d} + F''_{x,d} = 238,4 \text{ kN} > F_{min} = 57,2 \text{ kN} \quad (69)$$

- Fuerza transversal, $F_{y,d}$. Se obtiene de forma análoga a la fuerza longitudinal.
 - Fuerza generada por las deformaciones impuestas, donde $v'_{y,d}$, se obtiene de la tabla 25:

$$F'_{y,d} = \frac{v'_{y,d} \cdot G \cdot A}{T_q} = \frac{0 \cdot 0,9 \cdot \left(\frac{\pi \cdot 900^2}{4}\right)}{100} = 0 \text{ kN} \quad (70)$$

- Fuerza instantánea, obtenida de la tabla 25:

$$F''_{y,d} = 0 \text{ kN} \quad (71)$$

- Además, se debe verificar que la fuerza transversal total ($F'_{y,d} + F''_{y,d}$) es mayor que la fuerza producida por el desplazamiento mínimo de 10 mm:

$$F_{min} = \frac{v_{min} \cdot G \cdot A}{T_q} = \frac{10 \cdot 0,9 \cdot \left(\frac{\pi \cdot 900^2}{4}\right)}{100} = 57.255 \text{ N} = 57,2 \text{ kN} \quad (72)$$

Con ello se obtiene la fuerza horizontal transversal:

$$F_{y,d} = F'_{y,d} + F''_{y,d} = 0 \text{ kN} < F_{min} = 57,2 \text{ kN} \rightarrow F_{y,d} = 57,2 \text{ kN} \quad (73)$$

A partir de ambas fuerzas se obtiene la fuerza horizontal de cálculo:

$$F_{xy,d} = \sqrt{F_{x,d}^2 + F_{y,d}^2} = \sqrt{238,4^2 + 57,2^2} = 245,2 \text{ kN} \quad (74)$$

Finalmente se verifica que se cumple la condición de estabilidad relativa al deslizamiento:

$$F_{xy,d} \leq \mu_e \cdot F_{z,d,min} \quad (75)$$

$$245,2 \text{ kN} \leq 1.115,8 \text{ kN} = 0,20072 \cdot 5.558,9 \text{ kN} \quad (76)$$

7.3 Comprobación de los apoyos de estribos

En los apartados siguientes se realiza la comprobación de los apoyos de estribos para la geometría final definida en el apartado 5.4 y las reacciones incluidas en el apartado 6. Para evitar alargar demasiado el contenido de esta guía, al contrario de lo que se ha hecho para los apoyos de pilas, en este apartado no se desarrollarán los cálculos para la combinación pésima, puesto que éstos son análogos a los realizados en el apartado 7.2.

En la tabla siguiente, se recuerdan las características de los apoyos de estribos.

Tabla 37 Resumen de la configuración final de los apoyos de estribos

Apoyos	Tipo de apoyo	Dimensiones en planta [mm]	Capas internas de elastómero [mm]	Capas de elastómero exteriores [mm]	Placas de zunchado [mm]	Placas de acero exteriores [mm]	Altura total del apoyo [mm]	A_1 [mm ²]	S
Estribo: inferiores 2 apoyos rectang.	Tipo C	$a \times b = 400 \times 500$ $a' \times b' = 390 \times 490$	7 capas de 12 mm $T_e = T_q = 84 \text{ mm}$	- Apoyo anclado	6 placas de 4 mm	2 placas de 18 mm	144	191.100	9,05
Estribo: superiores 2 apoyos rectang.	Tipo C-E	$a \times b = 200 \times 250$ $a' \times b' = 190 \times 240$	3 capas de 8 mm $T_e = T_q = 24 \text{ mm}$	- Apoyo anclado	2 placas de 3 mm	2 placas de 15 mm	60	45.600	6,6

7.3.1 Apoyos inferiores

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

En la tabla siguiente se determina la deformación tangencial debida a las cargas de compresión en los apoyos inferiores para las distintas combinaciones estudiadas. Se analiza únicamente el apoyo con mayor reacción vertical de compresión, al tratarse del apoyo en las condiciones más desfavorables para esta comprobación.

Tabla 38 Determinación de la deformación tangencial de cálculo debida a la carga de compresión, $\varepsilon_{c,d}$, en los apoyos inferiores de estribos

Deformación tangencial de cálculo debida a la carga de compresión, $\varepsilon_{c,d}$							
Apoyo	Combinación	$F_{z,d}$ [kN]	$v_{x,d}$ (a) (b) (e) [mm]	$v_{y,d}$ (a) (b) (e) [mm]	A_r (c) [mm ²]	$\varepsilon_{c,d}$	$\sigma_{c,d}$ (d) [MPa]
Estribos (apoyos inferiores) 400 x 500 x 84	I	2.629,6	10,00	13,15	181.073	2,67	14,5
	II	2.609,1	34,97	13,15	168.839	2,85	15,5
	III	1.354,1	34,97	13,15	168.839	1,48	8,0
	IV	1.696,6	73,04	10,00	151.412	2,06	11,2
	V	2.609,1	34,97	13,15	168.839	2,85	15,5
	VI	1.726,5	54,78	10,00	160.359	1,98	10,8
	VII	No aplica					
	VIII	1.742,2	39,13	10,00	168.028	1,91	10,4
	IX	No aplica					
	X	423,6	27,50	10,00	173.723	0,45	2,4

^(a) Véanse las expresiones (12), (13) y (14) de esta guía para la obtención de $v_{x,d}$ y $v_{y,d}$ donde:

$v_{x,d} = v'_{x,d} + v''_{x,d}$ es el desplazamiento horizontal en la dirección del eje del tablero (longitudinal) generado por las deformaciones impuestas y las fuerzas instantáneas

$v_{y,d} = v'_{y,d} + v''_{y,d}$ desplazamiento horizontal en la dirección perpendicular al eje del tablero (transversal) generado por las deformaciones impuestas y las fuerzas instantáneas

^(b) Se han tenido en cuenta los desplazamientos mínimos indicados en el apartado 5.5 de UNE-EN 1337-1.

^(c) Véase la expresión (20) de esta guía.

^(d) $\sigma_{c,d} = F_{z,d} / A_r$.

^(e) Véase el apartado 3.4 de esta guía.

Se destaca en negrita la combinación pésima para la determinación de la deformación tangencial debida a las cargas de compresión en los apoyos inferiores, combinación II, que no corresponde a la combinación de máxima carga vertical de compresión. Analizando la columna correspondiente a $\sigma_{c,d}$ se verifica que se cumple el criterio adoptado en el predimensionamiento (véase el apartado 4 de esta guía) de limitar la presión de contacto en los apoyos a 20-25 MPa en ELU.

7.3.1.2 Deformación tangencial de cálculo por desplazamientos horizontales, $\varepsilon_{q,d}$

En la tabla siguiente se determina la deformación tangencial por desplazamientos horizontales para las distintas combinaciones estudiadas. Esta comprobación es válida tanto para el apoyo más cargado como para el apoyo menos cargado puesto que ambos están sometidos a las mismas fuerzas y desplazamientos horizontales.

Tabla 39 Determinación de la deformación tangencial de cálculo por desplazamientos horizontales, $\varepsilon_{q,d}$, en los apoyos inferiores de los estribos

Deformación tangencial de cálculo por desplazamientos horizontales, $\varepsilon_{q,d}$						
Apoyo	Combinación	$V_{x,d}^{(a) (b) (c)}$ [mm]	$V_{y,d}^{(a) (b) (c)}$ [mm]	$V_{xy,d}$ [mm]	$\varepsilon_{q,d}$	$\varepsilon_{q,d} < 1,0?$
Estribos (apoyos inferiores) 400 x 500 x 84	I	10,00	13,15	16,5	0,20	OK
	II	34,97	13,15	37,4	0,44	OK
	III	34,97	13,15	37,4	0,44	OK
	IV	73,04	10,00	73,7	0,88	OK
	V	34,97	13,15	37,4	0,44	OK
	VI	54,78	10,00	55,7	0,66	OK
	VII					
	VIII	39,13	10,00	40,4	0,48	OK
	IX					
	X	27,50	10,00	29,3	0,35	OK

^(a) Véanse las expresiones (12), (13) y (14) de esta guía para la obtención de $v_{x,d}$ y $v_{y,d}$ donde:

$v_{x,d} = v'_{x,d} + v''_{x,d}$ es el desplazamiento horizontal en la dirección del eje del tablero (longitudinal) generado por las deformaciones impuestas y las fuerzas instantáneas

$v_{y,d} = v'_{y,d} + v''_{y,d}$ desplazamiento horizontal en la dirección perpendicular al eje del tablero (transversal) generado por las deformaciones impuestas y las fuerzas instantáneas

^(b) Se han tenido en cuenta los desplazamientos mínimos indicados en el apartado 5.5 de UNE-EN 1337-1.

^(c) Véase el apartado 3.4 de esta guía

Se destaca en negrita la combinación pésima para la determinación y comprobación de la deformación tangencial por desplazamientos horizontales de cálculo en los apoyos inferiores, la combinación IV, que corresponde a la de máxima fuerza longitudinal. Como se puede observar en la tabla anterior, todos los valores de la deformación tangencial por desplazamientos horizontales obtenidos son inferiores a 1,0, por lo que el apoyo cumple con esta condición.

7.3.1.3 Deformación tangencial de cálculo debida a la rotación angular,

$$\varepsilon_{\alpha,d}$$

En la tabla siguiente se determina la deformación tangencial debida a la rotación angular para las distintas combinaciones estudiadas. Esta comprobación es válida tanto para el apoyo más cargado como para el apoyo menos cargado puesto que ambos están sometidos a los mismos giros.

Tabla 40 Determinación de la deformación tangencial de cálculo debido a la rotación angular, $\varepsilon_{\alpha,d}$, en los apoyos inferiores de estribos

Deformación tangencial de cálculo debido a la rotación angular, $\varepsilon_{\alpha,d}$					
Apoyo	Combinación	$\alpha_{a,d}^{(a)}$ [rad]	$\alpha_{b,d}^{(a)}$ [rad]	$\varepsilon_{\alpha,d}$	
Estribos (apoyos inferiores) 400 x 500 x 84	I	0,0030	0,0	0,23	
	II	0,0030	0,0	0,23	
	III	0,0030	0,0	0,23	
	IV	0,0030	0,0	0,23	
	V	0,0030	0,0	0,23	
	VI	0,0030	0,0	0,23	
	VII	No aplica			
	VIII	0,0061	0,0	0,46	
	IX	No aplica			
	X	0,0030	0,0	0,23	

^(a) Se han tenido en cuenta los giros mínimos indicados en el apartado 5.5 de UNE-EN 1337-1. En los ejes de estribos no se producen giros transversales puesto que las torsiones se resisten mediante un par de fuerzas verticales; por ello no se considera un giro mínimo en esta dirección.

Se destaca en negrita la combinación pésima para la determinación de la deformación tangencial debido a la rotación angular en los apoyos inferiores, la combinación VIII, que corresponde a la de máximo giro longitudinal.

7.3.1.4 Comprobación del límite de deformación tangencial de cálculo máxima

Tabla 41 Determinación y comprobación de la deformación tangencial de cálculo máxima, $\varepsilon_{t,d}$, en los apoyos inferiores de estribos

Deformación tangencial de cálculo máxima, $\varepsilon_{t,d}$							
Apoyo	Combinación	$\varepsilon_{c,d}$	$\varepsilon_{q,d}$	$\varepsilon_{\alpha,d}$	$\varepsilon_{t,d}$	$\varepsilon_{t,d} < 7,0?$	
Estribos (apoyos inferiores) 400 x 500 x 84	I	2,67	0,20	0,23	3,10	OK	
	II	2,85	0,44	0,23	3,52	OK	
	III	1,48	0,44	0,23	2,15	OK	
	IV	2,06	0,88	0,23	3,17	OK	
	V	2,85	0,44	0,23	3,52	OK	
	VI	1,98	0,66	0,23	2,87	OK	
	VII	No aplica					
	VIII	1,91	0,48	0,46	2,85	OK	
	IX	No aplica					
	X	0,45	0,35	0,23	1,02	OK	

En la tabla anterior se han destacado en negrita las combinaciones condicionantes para la determinación de los tres tipos de deformación tangencial que permiten determinar la deformación tangencial de cálculo máxima, $\varepsilon_{t,d}$. Como se puede observar, el valor máximo de $\varepsilon_{t,d}$ se obtiene para la combinación II y no supera el límite de $\varepsilon_{u,d} = \varepsilon_{u,k} / \gamma_m = 7,0/1,0 = 7,0$ por lo que el apoyo cumple.

7.3.1.5 Espesor mínimo de las placas de zunchado de acero

La hipótesis más desfavorable para esta comprobación es la correspondiente a la máxima relación $F_{z,d} / A_r$, que se obtiene para la combinación II. Se analiza únicamente el apoyo con mayor reacción vertical de compresión, al tratarse del apoyo en las condiciones más desfavorables para esta comprobación.

Tabla 42 **Espesor mínimo de las placas de zunchado de acero de los apoyos inferiores de estribos**

Espesor mínimo de las placas de zunchado de acero, t_s						
Apoyo	Combinación	$F_{z,d}$ [kN]	$V_{x,d}$ (a) (b) (d) [mm]	$V_{y,d}$ (a) (b) (d) [mm]	A_r (c) [mm ²]	$t_{s,min}$ [mm]
Estribos (apoyos inferiores) 400 x 500 x 84	II	2609,1	34,97	13,15	168.839	2,1

(a) Véanse las expresiones (12), (13) y (14) de esta guía para la obtención de $v_{x,d}$ y $v_{y,d}$ donde:

$v_{x,d} = v'_{x,d} + v''_{x,d}$ es el desplazamiento horizontal en la dirección del eje del tablero (longitudinal) generado por las deformaciones impuestas y las fuerzas instantáneas

$v_{y,d} = v'_{y,d} + v''_{y,d}$ desplazamiento horizontal en la dirección perpendicular al eje del tablero (transversal) generado por las deformaciones impuestas y las fuerzas instantáneas

(b) Se han tenido en cuenta los desplazamientos mínimos indicados en el apartado 5.5 de UNE-EN 1337-1.

(c) Véase la expresión (20) de esta guía

(d) Véase el apartado 3.4 de esta guía

Tal como se ha indicado en el apartado 5.4 de esta guía, las placas de zunchado de acero interiores serán de 4 milímetros de espesor, según la tabla 3 de UNE-EN 1337-3, que cumple con la condición $t_s \geq 2,1$ milímetros.

7.3.1.6 Comprobación de estabilidad relativa a la rotación

La condición más desfavorable para la comprobación de la estabilidad relativa a la rotación es la de reacción vertical (de compresión) reducida y giros elevados. Al tratarse de apoyos con poca o, en algunos casos, ninguna reacción vertical, esta es una comprobación importante para los apoyos de los estribos. En este caso, se realizará la comprobación tanto para el apoyo más cargado como para el apoyo menos cargado. Para evitar alargar demasiado este apartado, pero incluir toda la información necesaria a esta comprobación, se analizarán únicamente las hipótesis condicionantes en este caso:

- Máximo giro longitudinal y carga vertical concomitante
- Máximo giro longitudinal concomitante con levantamiento
- Máximo levantamiento con giro longitudinal concomitante

En proyecto se deberán comprobar todas las hipótesis de carga que puedan ser condicionantes.

En este apartado, se realiza la comprobación de la estabilidad a rotación tanto de los apoyos inferiores como de los apoyos superiores de los estribos; como se podrá comprobar a continuación, cuando se disponen topes anti-levantamiento es conveniente analizar ambos apoyos en simultáneo.

Tabla 43 Reacciones en apoyos de estribos

Condición límite de rotación				
Combinación	$F_{z,d,1}^{(a)}$ [kN]	$F_{z,d,2}^{(a)}$ [kN]	$\alpha_{a,d}^{(b)}$ [rad]	$\alpha_{b,d}^{(c) (d)}$ [rad]
Máximo levantamiento (comb. III para apoyos inferiores. Véase la tabla 26 de esta guía)	1.354,1	-846,0	0,04	0,00
Máximo giro longitudinal (comb. VIII para apoyos inferiores. Véase la tabla 26 de esta guía)	1.742,2	735,5	6,07	0,00
Máximo giro longitudinal concomitante con levantamiento (comb. II para apoyos superiores. Véase la tabla 27 de esta guía)	674,0	-134,0	3,82	0,00

^(a) Fuerza vertical: valores positivos de compresión en los apoyos inferiores; valores negativos de levantamiento, es decir, reacción de compresión en el apoyo superior.

^(b) Giros de eje perpendicular a la dimensión a del apoyo (en este caso, giros longitudinales).

^(c) Giros de eje perpendicular a la dimensión b del apoyo (en este caso, giros transversales).

^(d) En los ejes de estribos las torsiones se resisten mediante un par de fuerzas verticales en cada apoyo, por lo que no se producen giros transversales.

Comprobación del apoyo inferior más cargado:

Tabla 44 Comprobación de la condición límite de rotación en los apoyos inferiores más cargados de los estribos

Condición límite de rotación						
Combinación	$F_{z,d}$ [kN]	$\alpha_{a,d}^{(a)}$ [rad]	$\alpha_{b,d}^{(a)}$ [rad]	$V_{z,d}$ [mm]	$V_{\alpha,d}$ [mm]	$\epsilon V_{z,d} > V_{\alpha,d}?$
Máximo levantamiento (comb. III para apoyos inferiores. Véase la tabla 26 de esta guía)	1.354,1	0,0030	0,0	1,9	0,4	OK
Máximo giro longitudinal (comb. VIII para apoyos inferiores. Véase la tabla 26 de esta guía)	1.742,2	0,0061	0,0	2,5	0,8	OK
Máximo giro longitudinal concomi- tante con levantamiento (comb. II para apoyos superiores. Véase la tabla 27 de esta guía)	674,0	0,0038	0,0	1,0	0,5	OK

^(a) Se han tenido en cuenta los giros mínimos indicados en el apartado 5.5 de UNE-EN 1337-1. En los ejes de estribos no se producen giros transversales puesto que las torsiones se resisten mediante un par de fuerzas verticales; por ello no se considera un giro mínimo en esta dirección.

Como se puede observar en la tabla anterior, no hay levantamiento del extremo menos cargado del apoyo inferior, por lo que el apoyo cumple.

Comprobación del apoyo inferior menos cargado y apoyos superiores:

Tabla 45 Comprobación de la condición límite de rotación en los apoyos inferiores menos cargados y en los apoyos superiores de los estribos

Condición límite de rotación								
Combinación	$F_{z,d}$ [kN]	$\alpha_{a,d}^{(a)}$ [rad]	$\alpha_{b,d}^{(a)}$ [rad]	$V_{z,d,inf}^{(c)}$ [mm]	$V_{\alpha,d,inf}^{(d)}$ [mm]	$V_{z,d,sup}^{(e)}$ [mm]	$V_{\alpha,d,sup}^{(f)}$ [mm]	$\epsilon V_{z,d} > V_{\alpha,d}?$
Máximo levantamiento (comb. III para apoyos inferiores. Véase la tabla 26 de esta guía)	-846,0 ^(b)	0,0030	-	-	-	2,5	0,2	OK
Máximo giro longitudinal (comb. VIII para apoyos inferiores. Véase la tabla 26 de esta guía)	735,5	0,0061	-	1,0	0,8	-	-	OK
Máximo giro longitudinal concomitante con levantamiento (comb. II para apoyos superiores. Véase la tabla 27 de esta guía)	134,0 ^(b)	0,0038	-	-	-	0,4	0,2	OK

^(a) Se han tenido en cuenta los giros mínimos indicados en el apartado 5.5 de UNE-EN 1337-1. En los ejes de estribos no se producen giros transversales puesto que las torsiones se resisten mediante un par de fuerzas verticales; por ello no se considera un giro mínimo en esta dirección.

^(b) Reacción de levantamiento; compresión en el apoyo superior.

^(c) Deformación vertical por reacción vertical de compresión en el apoyo inferior.

^(d) Deformación vertical por giro en el apoyo inferior.

^(e) Deformación vertical por reacción vertical de compresión en el apoyo superior.

^(f) Deformación vertical por giro en el apoyo superior.

La hipótesis de máximo giro longitudinal se obtiene posicionando la sobrecarga en el vano lateral más cercano al estribo analizado, consiguiéndose, como consecuencia, reacciones verticales elevadas. Por otro lado, la hipótesis de levantamiento máximo se obtiene posicionando la sobrecarga en el vano central, por tanto, los giros longitudinales en los ejes de los estribos son reducidos. Como se puede observar en la tabla anterior, no hay levantamiento del extremo menos cargado de los apoyos en ninguno de los casos.

Comentario: Además de garantizar que los apoyos en carga cumplen con la condición de no levantamiento del extremo menos cargado, conviene garantizar que no se produce contacto entre el tablero y el apoyo sin carga ya que introduciría en el último un giro sin carga vertical.

En este caso, la situación más desfavorable se puede observar en la tabla 45, para la combinación de máximo giro longitudinal concomitante con levantamiento: el tablero se

eleva 0,4 mm por la compresión del apoyo superior y, en extremos opuestos del apoyo superior, se eleva y desciende 0,24 mm por el giro; por tanto, en el extremo menos cargado del apoyo no hay pérdida de contacto. No obstante, la elevación y descenso teóricos del tablero debido al giro cuando se analiza en los extremos del apoyo inferior es de 0,5 mm (el apoyo inferior tiene 400 mm de dimensión longitudinal, en lugar de los 200 mm del apoyo superior). En este punto, los 0,4 mm de elevación del tablero por la compresión del apoyo superior no compensan los 0,5 mm teóricos de descenso del tablero por giro, por lo que existiría un ligerísimo contacto entre tablero y una pequeña zona del apoyo inferior. Es importante destacar que, en este caso, se trata de una diferencia casi nula (≈ 0 mm) y despreciable.

En la hipótesis de máximo levantamiento no hay contacto entre tablero y apoyo inferior: se obtienen 2,5 mm de elevación del tablero por compresión del apoyo superior frente a 0,5 mm teóricos de descenso y elevación en los extremos del apoyo inferior debido al giro del tablero.

Para las hipótesis de carga con compresión en los apoyos inferiores, el cumplimiento de la condición de no levantamiento del extremo menos cargado de los apoyos inferiores garantiza que no hay contacto entre el tablero y el apoyo superior: cuando el tablero está en contacto con los apoyos inferiores, la elevación y descenso del tablero debido a los giros en los extremos del apoyo inferior (de mayor dimensión longitudinal que el apoyo superior), serán superiores a los obtenidos en los extremos del apoyo superior.

7.3.1.7 Comprobación de estabilidad relativa a pandeo

En la tabla siguiente se verifica el cumplimiento de la estabilidad relativa a pandeo establecida por UNE-EN 1337-3 para los apoyos inferiores en ejes de estribo:

Tabla 46 Comprobación de estabilidad relativa a pandeo en los apoyos inferiores de estribos

Estabilidad relativa a pandeo							
Apoyo	Combinación	$F_{z,d}$ [kN]	$A_r^{(a)}$ [m ²]	$F_{z,d}/A_r$ [MPa]	$\sigma_{lim,d}$ [MPa]	$\frac{F_{z,d}}{A_r} < \sigma_{lim,d}?$	
Estribos (apoyos inferiores) 400 x 500 x 84	I	2.629,6	181.073	14,5	25,2	OK	
	II	2.609,1	168.839	15,5		OK	
	III	1.354,1	168.839	8,0		OK	
	IV	1.696,6	151.412	11,2		OK	
	V	2.609,1	168.839	15,5		OK	
	VI	1.726,5	160.359	10,8		OK	
	VII	No aplica					
	VIII	1.742,2	168.028	10,4	25,2	OK	
	IX	No aplica					
	X	423,6	173.723	2,4	25,2	OK	

^(a) Véase la tTabla 38 y la expresión (20) de esta guía.

Se destaca en **negrita** la combinación pésima para la verificación de la condición de estabilidad relativa a pandeo en los apoyos inferiores, combinación II, que no corresponde a la combinación de máxima carga vertical de compresión.

Como se puede observar, los valores de la presión de contacto en los apoyos para las combinaciones de carga analizadas son inferiores al límite definido por UNE-EN 1337-3, por lo que los apoyos predimensionados cumplen.

7.3.1.8 Comprobación de estabilidad relativa al deslizamiento

Esta verificación tiene como objetivo evitar el reptado de los apoyos por la presencia de cargas horizontales superiores a las fuerzas de rozamiento. No obstante, tanto los apoyos inferiores como los apoyos superiores de los estribos estarán anclados, por lo que esta comprobación no aplica.

7.3.2 Apoyos superiores (topes anti-levantamiento)

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

Al tratarse de apoyos deslizantes, la situación pésima para la comprobación de la deformación tangencial debida a las cargas de compresión en los apoyos superiores se da para la hipótesis de carga de compresión máxima puesto que también es esta la que genera las máximas (y únicas) fuerzas horizontales, las fuerzas de rozamiento ($F_{x,d} = F_{y,d} = F_{z,d} \cdot \mu$). Para la obtención de las fuerzas de rozamiento, se considera, tal como se ha procedido en el apartado de predimensionamiento (apartado 4 de esta guía), un coeficiente de rozamiento $\mu = 3\%$.

Tabla 47 **Determinación de la deformación tangencial de cálculo debida a la carga de compresión, $\epsilon_{c,d}$, en los apoyos superiores (topes anti-levantamiento) de estribos**

Deformación tangencial de cálculo debida a la carga de compresión, $\epsilon_{c,d}$									
Apoyo	Combinación	$F_{z,d}$ [kN]	$F_{x,d}^{(a)}$ [kN]	$F_{y,d}^{(a)}$ [kN]	$V_{x,d}^{(b)(c)}$ [mm]	$V_{y,d}^{(b)(c)}$ [mm]	$A_r^{(d)}$ [mm ²]	$\epsilon_{c,d}$	$\sigma_{c,d}$ [MPa]
Estribos (apoyos superiores) 200 x 250 x 24	I	-846	25,4	25,4	13,5	13,5	39.780	5,35	21,3
	II	-134	4,0	4,0	10	10	41.300	0,82	3,2

^(a) Fuerzas de rozamiento.

^(b) Se han tenido en cuenta los desplazamientos mínimos indicados en el apartado 5.5 de UNE-EN 1337-1.

^(c) Movimientos debidos a las fuerzas de rozamiento = $((F_{x,d} \circ F_{y,d}) \cdot T_q) / (G \cdot A)$.

^(d) Véase la expresión (20) de esta guía.

Como se puede verificar, se cumple el criterio de limitar la presión de contacto en los apoyos a, aproximadamente, 20 MPa en ELU.

7.3.2.2 Deformación tangencial de cálculo por desplazamientos horizontales, $\varepsilon_{q,d}$

Los únicos desplazamientos horizontales actuantes en los apoyos superiores resultan de las fuerzas de rozamiento.

Tabla 48 Determinación de la deformación tangencial de cálculo por desplazamientos horizontales de cálculo, $\varepsilon_{q,d}$, en los apoyos superiores (topes anti-levantamiento) de estribos

Deformación tangencial de cálculo por desplazamientos horizontales, $\varepsilon_{q,d}$						
Apoyo	Combinación	$V_{x,d}^{(a)}$ [mm]	$V_{y,d}^{(a)}$ [mm]	$V_{xy,d}$ [mm]	$\varepsilon_{q,d}$	$\dot{\varepsilon}_{q,d} < 1,0?$
Estribos (apoyos superiores) 200 x 250 x 24 ^(b)	I	13,5	13,5	19,1	0,80	OK
	II	10	10	14,1	0,59	OK

^(a) Movimientos debidos a las fuerzas de rozamiento = $((F_{x,d} \circ F_{y,d}) \cdot T_q) / (G \cdot A)$.

Como se puede observar en la tabla anterior, la deformación tangencial por desplazamientos horizontales obtenida es inferior a 1,0.

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

Para la determinación de la deformación tangencial debida a la rotación angular se tienen en cuenta dos condiciones:

- Máximo giro longitudinal concomitante con levantamiento
- Máximo levantamiento con giro longitudinal concomitante

Tabla 49 Determinación de la deformación tangencial de cálculo debido a la rotación angular, $\varepsilon_{\alpha,d}$, en los apoyos superiores (topes anti-levantamiento) de estribos

Deformación tangencial de cálculo debido a la rotación angular, $\varepsilon_{\alpha,d}$				
Apoyo	Combinación	$\alpha_{a,d}^{(a)}$ [rad]	$\alpha_{b,d}^{(a)}$ [rad]	$\varepsilon_{\alpha,d}$
Estribos (apoyos superiores) 200 x 250 x 24	I	0,003	0,0	0,28
	II	0,0038	0,0	0,36

^(a) Se han tenido en cuenta los giros mínimos indicados en el apartado 5.5 de UNE-EN 1337-1.

Comentario: Cuando los apoyos inferiores están en carga, no hay contacto entre tablero y apoyos superiores. Véase el apartado 7.3.1.6 de esta guía.

7.3.2.4 Comprobación del límite de deformación tangencial de cálculo máxima

Tabla 50 Determinación y comprobación de la deformación tangencial de cálculo máxima, $\varepsilon_{t,d}$, en los apoyos superiores de los topes anti-levantamiento de estribos

Deformación tangencial de cálculo máxima, $\varepsilon_{t,d}$						
Apoyo	Combinación	$\varepsilon_{c,d}$	$\varepsilon_{q,d}$	$\varepsilon_{\alpha,d}$	$\varepsilon_{t,d}$	$\varepsilon_{t,d} < 7,0?$
Estribos (apoyos superiores) 200 x 250 x 24	I	5,35	0,80	0,28	6,43	OK
	II	0,82	0,59	0,36	1,76	OK

Como se puede verificar, un apoyo con 200 x 250 milímetros de dimensiones en planta y 24 milímetros de espesor total de neopreno permite verificar la condición $\varepsilon_{u,d} = \varepsilon_{u,k} / \gamma_m = 7,0 / 1,0 = 7,0$.

7.3.2.5 Espesor mínimo de las placas de zunchado de acero

La hipótesis más desfavorable para esta comprobación es la correspondiente a la máxima relación $F_{z,d} / A_r$, que se obtiene para la combinación I.

Tabla 51 Espesor mínimo de las placas de zunchado de acero de los apoyos superiores de estribos

Espesor mínimo de las placas de zunchado de acero, t_s						
Apoyo	Combinación	$F_{z,d}$ [kN]	$V_{x,d}$ [mm]	$V_{y,d}$ [mm]	$A_r^{(a)}$ [mm ²]	$t_{s,min}$ [mm]
Estribos (apoyos superiores) 200 x 250 x 24	I	-846	13,5	13,5	39.780	2

^(a) Véase la expresión (20) de esta guía.

Tal como se ha indicado en el apartado 5.4 de esta guía, las placas de zunchado de acero interiores serán de 3 milímetros de espesor, según la tabla 3 de UNE-EN 1337-3, que cumple con la condición $t_s \geq 2,0$ milímetros.

7.3.2.6 Comprobación de estabilidad relativa a la rotación

La comprobación de la estabilidad relativa a la rotación de los apoyos inferiores y superiores de los estribos se realiza en conjunto en el apartado 7.3.1.6 de esta guía.

7.3.2.7 Comprobación de estabilidad relativa a pandeo

Se verifica el cumplimiento de la estabilidad relativa a pandeo para la combinación de máxima carga de compresión en los apoyos superiores, que también coincide con la hipótesis de máximas fuerzas horizontales, y, por ende, desplazamientos.

Tabla 52 Comprobación de estabilidad relativa a pandeo en los apoyos superiores (topes anti-levantamiento) de estribos

Estabilidad relativa a la torsión						
Apoyo	Combinación	$F_{z,d}$ [kN]	A_r ^(a) [mm ²]	$F_{z,d}/A_r$ [MPa]	$\sigma_{lim,d}$ [MPa]	$\frac{F_{z,d}}{A_r} < \sigma_{lim,d}?$
Estribos (apoyos superiores) 200 x 250 x 24	I	-846	39.780	21,3	31,5	OK
	II	-134	41.300	3,3		OK

^(a) Véase la expresión (20) de esta guía.

Como se puede observar, la presión de contacto en los apoyos es inferior al límite definido por UNE-EN 1337-3.

7.3.2.8 Comprobación de estabilidad relativa al deslizamiento

Esta verificación tiene como objetivo evitar el reptado de los apoyos por la presencia de elevadas cargas horizontales y bajo nivel de carga de compresión. Tal como se ha indicado en apartados anteriores de esta guía, tanto los apoyos inferiores como los apoyos superiores de los estribos estarán anclados, por lo que esta comprobación no aplica.

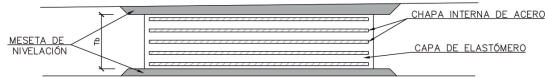
8

EJEMPLO DE PLANO DE APOYOS A INCLUIR EN EL PROYECTO

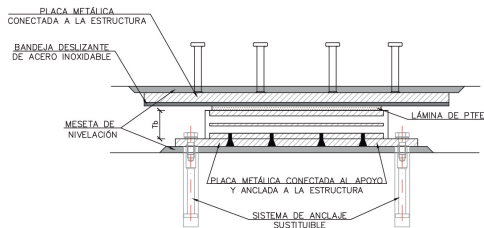


CUADRO DE DEFINICIÓN DE APARATOS DE APOYO			
EJE DE APOYO	TIPO DE APOYO	DIMENSIONES $a \times b \times T_b (T_a)$ $D \times T_b (T_a)$	COMPOSICIÓN DEL APARATO DE APOYO
E-1 TOPE ANTI-LEVANT.	TIPO C-E	200x250x60(24)	LÁMINA PTFE + PLACA EXTERNA DE ACERO DE 15 MM + 3 CAPAS DE ELASTÓMERO DE 8 MM Y 2 PLACAS DE ACERO DE 3 MM + PLACA EXTERNA DE ACERO DE 15 MM
E-1	TIPO C	400x500x144(84)	PLACA EXTERNA DE ACERO DE 18 MM + 7 CAPAS DE ELASTÓMERO DE 12 MM Y 6 PLACAS DE ACERO DE 4 MM + PLACA EXTERNA DE ACERO DE 18 MM
P-1	TIPO B	900x135(100)	CAPA EXTERNA DE ELASTÓMERO DE 2,5 MM + 5 CAPAS DE ELASTÓMERO DE 20 MM Y 6 PLACAS DE ACERO DE 5 MM + CAPA EXTERNA DE ELASTÓMERO DE 2,5 MM
P-2	TIPO B	900x135(100)	CAPA EXTERNA DE ELASTÓMERO DE 2,5 MM + 5 CAPAS DE ELASTÓMERO DE 20 MM Y 6 PLACAS DE ACERO DE 5 MM + CAPA EXTERNA DE ELASTÓMERO DE 2,5 MM
E-2	TIPO C	400x500x144(84)	PLACA EXTERNA DE ACERO DE 18 MM + 7 CAPAS DE ELASTÓMERO DE 12 MM Y 6 PLACAS DE ACERO DE 4 MM + PLACA EXTERNA DE ACERO DE 18 MM
E-2 TOPE ANTI-LEVANT.	TIPO C-E	200x250x60(24)	LÁMINA PTFE + PLACA EXTERNA DE ACERO DE 15 MM + 3 CAPAS DE ELASTÓMERO DE 8 MM Y 2 PLACAS DE ACERO DE 3 MM + PLACA EXTERNA DE ACERO DE 15 MM

LEYENDA:
 a [mm]: DIMENSIÓN LONGITUDINAL DE UN APARATO DE APOYO ELASTOMÉRICO RECTANGULAR
 b [mm]: DIMENSIÓN TRANSVERSAL DE UN APARATO DE APOYO ELASTOMÉRICO RECTANGULAR
 D [mm]: DIÁMETRO DE UN APARATO DE APOYO ELASTOMÉRICO CIRCULAR
 T_b [mm]: ESPESOR TOTAL DEL APARATO DE APOYO ELASTOMÉRICO
 T_a [mm]: ESPESOR NETO DE GOMA DEL APARATO DE APOYO ELASTOMÉRICO (SEGÚN LO INDICADO EN UNE-EN 1337-3, NO SE TIENEN EN CUENTA LAS CAPAS DE ELASTÓMERO EXTERIORES SI ESTAS TIENEN UN ESPESOR IGUAL O INFERIOR A 2,5 MILÍMETROS)

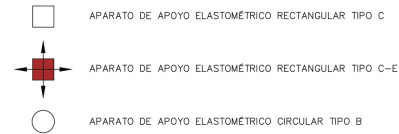


DETALLE 1: VISTA LONGITUDINAL (A-A) DE APARATO DE APOYO ELASTOMÉRICO TIPO B
 SIN ESCALA
 NOTA: CROQUIS ORIENTATIVO. LAS DIMENSIONES DE LOS APOYOS SE DEFINEN EN EL CUADRO DE DEFINICIÓN DE APARATOS DE APOYO

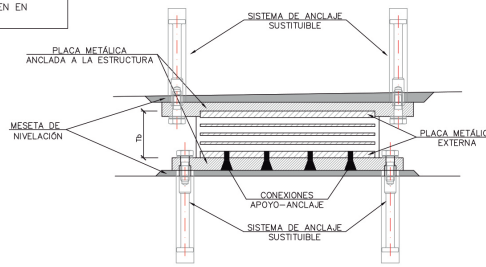


DETALLE 2: VISTA LONGITUDINAL (A-A) DE APARATO DE APOYO ELASTOMÉRICO TIPO C
 SIN ESCALA
 NOTA: CROQUIS ORIENTATIVO. LAS DIMENSIONES DE LOS APOYOS SE DEFINEN EN EL CUADRO DE DEFINICIÓN DE APARATOS DE APOYO

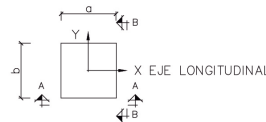
LEYENDA DE APARATOS DE APOYO ELASTOMÉRICOS



- TIPO B: APOYOS ELASTOMÉRICOS.
- TIPO C: APOYOS ELASTOMÉRICOS ANCLADOS.
- TIPO C-E: APOYOS ELASTOMÉRICOS TIPO C PROVISTOS DE UNA LÁMINA DE PTFE EN LA CARA SUPERIOR, ENCASTRADA SOBRE UNA PLACA DE ACERO VULCANIZADA AL APOYO.



DETALLE 3: VISTA LONGITUDINAL (A-A) DE APARATO DE APOYO ELASTOMÉRICO TIPO C-E
 SIN ESCALA
 NOTA: CROQUIS ORIENTATIVO. LAS DIMENSIONES DE LOS APOYOS SE DEFINEN EN EL CUADRO DE DEFINICIÓN DE APARATOS DE APOYO



CROQUIS DE PLANTA DE APARATO DE APOYO
 SIN ESCALA

NOTAS GENERALES:

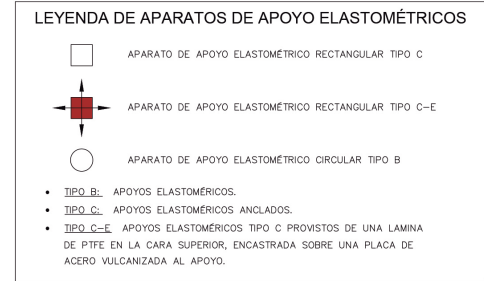
- LOS APARATOS DE APOYO DEBERÁN CONTAR CON MARCADO CE Y ESTAR DISEÑADOS Y FABRICADOS CONFORME A LA NORMA UNE-EN 1337
- TODOS LOS APOYOS DEBEN SER SUSTITUIBLES
- LAS DIMENSIONES DE LOS APOYOS SON APROXIMADAS Y DEBERÁN SER CONFIRMADAS POR EL FABRICANTE, CUALQUIER CAMBIO EN LA GEOMETRÍA EN PLANTA Y ESPESOR NETO TOTAL QUE NO CUMPLA CON LAS TOLERANCIAS DE LA NORMA UNE-EN 1337-3, EXIGIRÁ VERIFICAR LA AFECCIÓN AL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DEL PUENTE
- LOS VALORES ADOPTADOS PARA EL DISEÑO DE LOS APOYOS Y DE LA SUBESTRUCTURA HAN SIDO:
 - $G_{nom} = 0,9$ MPa (DEFORMACIONES LENTAS)
 - $G_{inst} = 1,8$ MPa (FUERZAS INSTANTÁNEAS)
 - DISTORSIÓN MÁXIMA, EN ELLO, DEBIDO A FUERZAS Y DESPLAZAMIENTOS HORIZONTALES = 1,0
- LOS APOYOS 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 APARATOS DE APOYOS 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 CON GOMA, 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 DEL APOYO TIPO C-E
- EL MATERIAL DESLIZANTE DEBERÁ ASEGURAR UN ROZAMIENTO MÁXIMO DEL 3% DE LA CARGA VERTICAL Y UNA VIDA ÚTIL CONFORME A LOS REQUISITOS DE LA NORMATIVA VIGENTE.

NOTAS PARA EL CUADRO DE DEFINICIÓN DE APOYOS:

- EL ESPESOR BRUTO (T_b) DE LOS APARATOS DE APOYO TIPO C NO TIENE EN CUENTA LAS PLACAS DE FIJACIÓN DE LOS APOYOS A LA ESTRUCTURA (VEASE EL DETALLE 2)
- EL ESPESOR BRUTO (T_b) DE LOS APARATOS DE APOYO TIPO C-E NO TIENE EN CUENTA NI LAS PLACAS DE FIJACIÓN DE LOS APOYOS A LA ESTRUCTURA NI LA LÁMINA PTFE (VEASE EL DETALLE 3)
- EL ESPESOR NETO (T_a) NO TIENE EN CUENTA LAS CAPAS DE ELASTÓMERO EXTERIORES SI ESTAS TIENEN UN ESPESOR IGUAL O INFERIOR A 2,5 MILÍMETROS
- LOS MOVIMIENTOS IMPUESTOS, μ , 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

NOTAS PARA LAS MESETAS NIVELACIÓN:

- LAS MESETAS DE NIVELACIÓN DEBERÁN GARANTIZAR EL APOYO DE LOS NEOPRENOS 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 SOBRECARGO DE LAS MESETAS RESPECTO A LAS DIMENSIONES DEL APOYO DEBERÁ SER, COMO MÍNIMO, 1,5 VECES LA ALTURA DE ESTA



CUADRO DE DEFINICIÓN DE REACCIONES EN APOYOS INFERIORES DE ESTRIBOS: E-1 y E-2

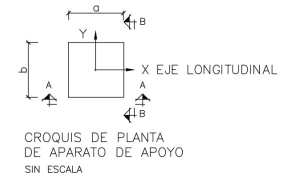
COMBINACIÓN DE ESTADO LIMITE ÚLTIMO	$F_{x,d}$ [kN]	$F_{y,d}$ [kN]	$F''_{x,d}$ (long) [kN]	$F''_{y,d}$ (transv) [kN]	$v'_{x,d}$ (long) [mm]	$v'_{y,d}$ (transv) [mm]	$\alpha_{x,d}$ (long) [mrad]	$\alpha_{y,d}$ (transv) [mrad]
$F_{x,d}$ máx	2629,6	220,4	0,0	56,3	6,2	0,0	1,27	-
$F_{x,d}$ mín	1354,1	- ^a	0,0	56,3	35,0	0,0	0,04	-
$F''_{x,d}$ máx (longitudinal) (ver NOTA*)	1696,6	716,8	112,2	0,0	46,9	0,0	1,20	-
$F''_{y,d}$ máx (transversal) (ver NOTA*)	2609,1	200,0	0,0	56,3	35,0	0,0	1,95	-
$v'_{x,d}$ máx (longitudinal) (ver NOTA*)	1726,5	746,8	0,0	0,0	54,8	0,0	0,77	-
$v'_{y,d}$ máx (transversal) (ver NOTA*)	-	-	-	-	-	-	-	-
$\alpha_{x,d}$ máx (longitudinal)	1742,2	735,5	0,0	0,0	39,1	0,0	6,07	-
$\alpha_{y,d}$ máx (transversal) (ver NOTA*)	-	-	-	-	-	-	-	-

^a Levantamiento. Véase el cuadro de definición de reacciones de los apoyos superiores de los estribos E-1 y E-2.

CUADRO DE DEFINICIÓN DE REACCIONES EN APOYOS SUPERIORES DE ESTRIBOS: E-1 y E-2 (APOYOS ANTI-LEVANT.)

COMBINACIÓN DE ESTADO LIMITE ÚLTIMO	$F_{x,d}$ [kN]	$F_{y,d}$ [kN]	$F''_{x,d}$ (long) ^b [kN]	$F''_{y,d}$ (transv) ^b [kN]	$v'_{x,d}$ (long) ^c [mm]	$v'_{y,d}$ (transv) ^c [mm]	$\alpha_{x,d}$ (long) [mrad]	$\alpha_{y,d}$ (transv) [mrad]
$F_{x,d}$ máx	- ^a	846,0	25,4	25,4	13,5	13,5	0,04	-
$\alpha_{x,d}$ máx (longitudinal)	-	-134	4,0	4,0	2,1	2,1	3,82	-

^a No hay levantamiento en este apoyo. Véase el cuadro de definición de reacciones de los apoyos inferiores de los estribos E-1 y E-2.
^b En el caso particular de los apoyos superiores, estas fuerzas corresponden a las fuerzas de rozamiento.
^c En el caso particular de los apoyos superiores, estos desplazamientos son los generados por las fuerzas de rozamiento.



CUADRO DE DEFINICIÓN DE REACCIONES EN APOYOS: P-1 Y P-2

COMBINACIÓN DE ESTADO LIMITE ÚLTIMO	$F_{x,d}$ [kN]	$F''_{x,d}$ (long) [kN]	$F''_{y,d}$ (transv) [kN]	$v'_{x,d}$ (long) [mm]	$v'_{y,d}$ (transv) [mm]	$\alpha_{x,d}$ (long) [mrad]	$\alpha_{y,d}$ (transv) [mrad]
$F_{x,d}$ máx	12871,6	0,0	85,8	8,9	0,0	2,44	5,41
$F_{x,d}$ mín	5153,8	0,0	85,8	2,1	0,0	1,67	1,78
$F''_{x,d}$ máx (longitudinal) (ver NOTA*)	5558,9	164,0	0,0	13,0	0,0	1,61	0,33
$F''_{y,d}$ máx (transversal) (ver NOTA*)	5194,7	0,0	85,8	8,9	0,0	2,38	1,78
$v'_{x,d}$ máx (longitudinal) (ver NOTA*)	10921,0	0,0	0,0	15,7	0,0	0,94	2,19
$v'_{y,d}$ máx (transversal) (ver NOTA*)	-	-	-	-	-	-	-
$\alpha_{x,d}$ máx (longitudinal)	7611,1	0,0	0,0	10,3	0,0	5,89	2,12
$\alpha_{y,d}$ máx (transversal) (ver NOTA*)	7810,0	0,0	85,8	8,9	0,0	2,62	7,88

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)
 $v'_{x,d}$ [mm]: MOVIMIENTO IMPUESTO EN LA DIRECCIÓN LONGITUDINAL, EN ELU (DEFORMACIONES IMPUESTAS)
 $v'_{y,d}$ [mm]: MOVIMIENTO IMPUESTO EN LA DIRECCIÓN TRANSVERSAL, EN ELU (DEFORMACIONES IMPUESTAS)
 $\alpha_{x,d}$ [mRad]: GIRO A LO LARGO DE LA DIMENSIÓN a DEL APOYO (GIRO LONGITUDINAL), EN ELU
 $\alpha_{y,d}$ [mRad]: GIRO A LO LARGO DE LA DIMENSIÓN b DEL APOYO (GIRO TRANSVERSAL), EN ELU

NOTA (*):

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_{infimo} Y CARGA PERMANENTE MÍNIMA A T_0 Y T_{infimo} POR SENCILLEZ, EN ESTE EJEMPLO SE EXPONEN LOS RESULTADOS ÚNICAMENTE PARA UNA DE LAS SITUACIONES DE CARGA PERMANENTE (LA QUE RESULTA MÁS CONDICIONANTE). NO OBSTANTE, EN EL DIMENSIONAMIENTO DE CUALQUIER APARATO DE APOYO DEBEN SER ANALIZADAS TODAS LAS HIPÓTESIS.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] VVAA: *Conservación de aparatos de apoyo, juntas y drenaje en puentes*. Monografía 18. Asociación Española de Ingeniería Estructural (ACHE). Madrid, 2011.
- [2] Arenas J., Aparicio A.: *Aparatos de apoyo para puentes y estructuras*. Universidad de Cantabria, 1981.
- [3] Asociación Técnica de Carreteras. *Aparatos de apoyo de puentes*. Comité Técnico de Puentes. Madrid, 1996.
- [4] Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente. Dirección General de Carreteras: *Nota técnica sobre aparatos de apoyo para puentes de carretera*. Secretaría General Técnica, Centro de Publicaciones, Madrid, 1995.
- [5] Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo. Dirección General de Carreteras: *Recomendaciones para el proyecto y puesta en obra de los apoyos elastoméricos para puentes de carretera*. Secretaría General Técnica, Centro de Publicaciones. Madrid, 1984.
- [6] Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible. Dirección General de Carreteras: *Guía para el cálculo de apoyos elastoméricos*. Secretaría General Técnica. Centro de Publicaciones. En curso.
- [7] Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible. Dirección General de Carreteras: *Guía para el cálculo de aisladores elastoméricos de bajo amortiguamiento en zona sísmica*. Secretaría General Técnica. Centro de Publicaciones. En curso.
- [8] Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible. Dirección General de Carreteras: *Guía para el cálculo de aisladores elastoméricos de bajo amortiguamiento en zona sísmica. Ejemplo de aplicación*. Secretaría General Técnica. Centro de Publicaciones. En curso.
- [9] VVAA: *Laminated elastomeric bearings*. Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement, Centre for Studies on Risks, the Environment, Mobility and Urban Planning (Cerema), 2007.

