



UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA DE MADRID



MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DE LAS
ESTRUCTURAS, CIMENTACIONES Y MATERIALES

TRABAJO FIN DE MÁSTER

COMPORTAMIENTO DE TABLEROS DE
PUENTES CON DISPOSITIVOS
ANTISÍSMICOS

AUTOR

DAVID VERA MANSILLA

TUTOR

ANTONIO MARTÍNEZ CUTILLAS

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

FRANCISCO MILLANES MATO

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

1. ÍNDICE

2. MOTIVACIÓN Y ANTECEDENTES	4
a. Historia	5
b. Normativa sismorresistente	8
c. Métodos convencionales de diseño antisísmico.....	16
d. Descripción funcional de los dispositivos antisísmicos	22
e. Dispositivos antisísmicos para puentes	25
3. ESTUDIO DE LOS DISTINTOS DISPOSITIVOS.....	31
a. Apoyo elastomérico con núcleo de plomo.....	31
b. Dispositivo pendular.....	37
c. Amortiguador viscoso.....	43
4. CÁLCULO DE LOS DISPOSITIVOS	48
a. Apoyo elastomérico con núcleo de plomo.....	50
b. Dispositivo pendular.....	53
c. Amortiguador viscoso.....	56
5. MODELO DE CÁLCULO	63
a. Descripción general	63
b. Uso de apoyos de neopreno convencionales.....	73
c. Uso de apoyos elastoméricos con núcleo de plomo	77
d. Uso de dispositivos pendulares	80
e. Amortiguadores viscosos.....	84
6. CONCLUSIONES	98
ANEXO: CATÁLOGOS DE FABRICANTES.....	102

2. MOTIVACIÓN Y ANTECEDENTES

El objetivo de la construcción frente a movimientos sísmicos es mantener unos límites mínimos de seguridad, servicio y confort humano. Estos límites se pueden conseguir mediante los métodos convencionales de diseño sísmico. Para evitar aceleraciones y desplazamientos excesivos que la estructura no podría resistir, se necesita disipar parte de la energía, lo que se suele conseguir mediante la plastificación de algunos elementos estructurales.

Frente al diseño convencional aparecen los dispositivos antisísmicos, que modifican la respuesta de la estructura en el caso de terremoto, limitando la energía que llega a la estructura y reduciendo, por tanto, la acción del terremoto sobre ésta. Al disminuir las sollicitaciones sobre la estructura, no es necesario llegar a la plastificación de los distintos elementos, manteniendo la construcción en servicio después del evento sísmico.

En el diseño antisísmico se pretende, en primer lugar, evitar las pérdidas humanas que puedan derivarse del colapso de la estructura, y una vez llegados a este punto, se trata de evitar los daños estructurales y los desperfectos que puedan llevar a la ruina de la construcción.

Los terremotos son impredecibles e inesperados. Una vez producido el sismo, los daños ocasionados impiden realizar una vida normal, siendo la recuperación muy difícil y costosa, por lo que la construcción con dispositivos antisísmicos es, pese a su coste, técnica y económicamente muy rentable.

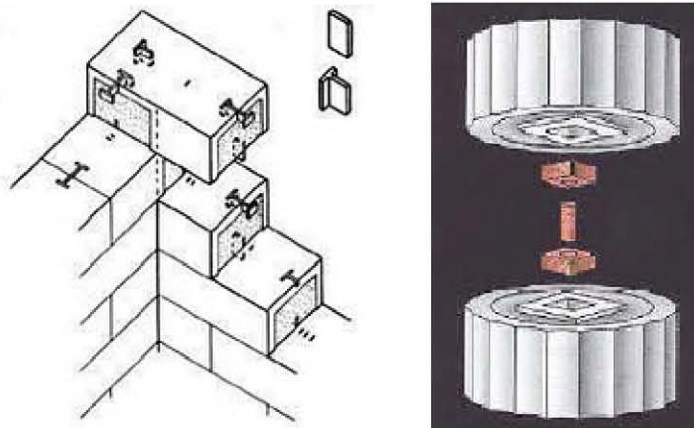
En este caso vamos a centrar nuestro estudio en los dispositivos antisísmicos más comunes usados en puentes, que son construcciones de gran importancia para la unión y el desarrollo de una región.

Antes de comenzar a analizar los distintos dispositivos vamos a introducirnos en el diseño antisísmico, las exigencias de la normativa española NCSP-07, las bases de proyecto para puentes en zonas sísmicas y por último la introducción de nuevos dispositivos. Todo ello nos ayudará a entender el porqué de su gran desarrollo actual.

a. Historia

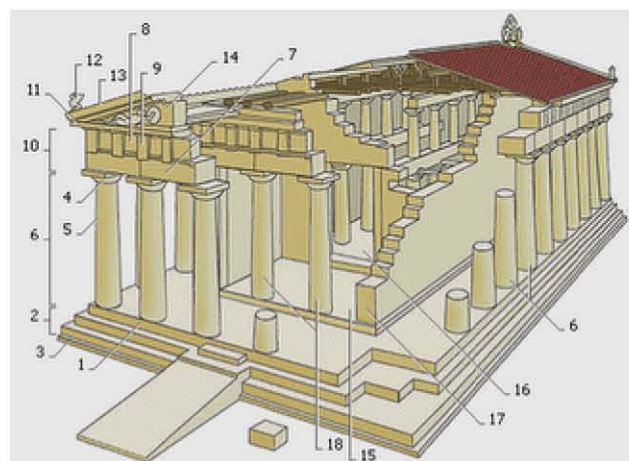
Ya desde época antigua se conocían los devastadores efectos de los terremotos, y para entonces ya se realizaban construcciones que podemos calificar de antisísmicas. Un gran ejemplo de ello es el Partenón de Atenas, que con 2500 años de existencia ha resistido en pie en una de las zonas con mayor actividad sísmica de Europa.

Entonces los bloques de mármol no se conectaban con argamasa sino con chapas metálicas selladas con plomo, como vemos en las imágenes, absorbiendo parte de la energía de los sismos. Estos sistemas los podemos considerar como los primeros dispositivos antisísmicos.



Comportamiento dinámico del Partenón:

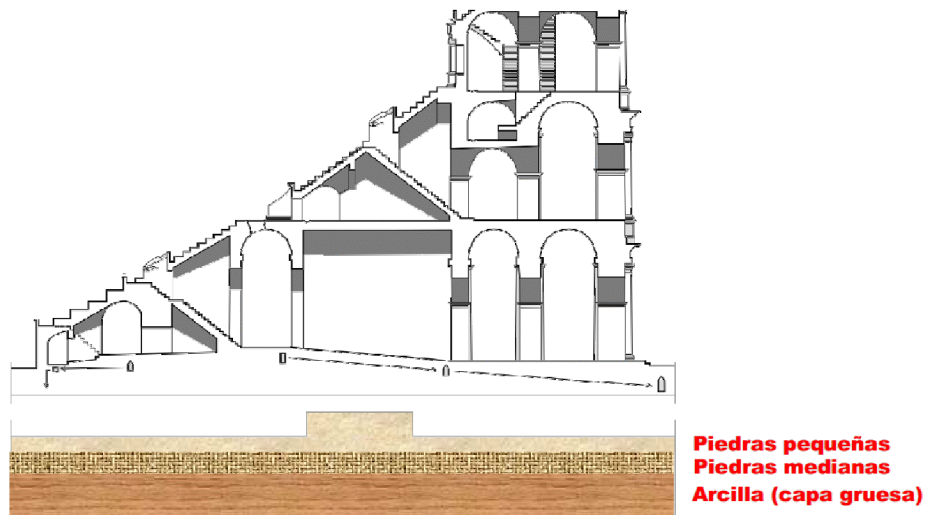
- Fachadas laterales: la columnata está conectada al muro a través del techo mediante conectores especiales de hierro entre las piedras de mármol. Comportamiento solidario.
- Fachadas frontales: se encuentran unidas entre sí y con el muro únicamente a través del rozamiento de las piezas de mármol. Movimientos independientes. Esto significa que los componentes del techo en esas zonas del templo están simplemente apoyados sobre el entablado de la columna y de la nave, sin ningún elemento de unión, permitiendo el movimiento independiente de cada parte.



Pero el caso del Partenón no es único. En algunos casos se lograba un aumento de la ductilidad mediante la utilización de morteros de arcilla y betún, como en el Palacio

Toprak-Kala, Uzbekistan, siglo III A.C., en contra de las rígidas construcciones de mampostería.

El procedimiento más usual de aislamiento consistía en colocar una capa de arena fina debajo de la cimentación con el fin de conseguir un apoyo deslizante, como ocurre en Knossos, Creta, 2000 A.C. En el Coliseo de Roma, siglo I D.C. (Imagen) se cimentó sobre una capa gruesa de arcilla y otras dos capas, una de piedras de dimensión mediana y otra de piedras pequeñas, solución ya usada en algunas ciudades griegas.



Pero el sistema utilizado en la antigüedad que más se parece a los dispositivos de aislación sísmica actual fue el utilizado en el templo griego de Panticapea, al norte del Mar Negro, en el que se colocaron barras de madera entre los muros y la cimentación disminuyendo la rigidez de la estructura.

Todas las obras anteriores son producto del ingenio e intuición de los constructores de la antigüedad, pero el diseño antisísmico tal como lo conocemos hoy ha sido desarrollado a lo largo del siglo XX, especialmente a finales de siglo con la introducción de los dispositivos antisísmicos.

En los años 20 y 30 se propuso la construcción de edificios con la planta baja flexible. Esta técnica consistía en dar menor rigidez a las columnas del primer nivel, con el propósito de que en caso de terremotos las deformaciones se concentrasen en la planta baja y de esta manera se absorbiera más energía. Posteriormente, se propuso una técnica derivada de ésta, denominada planta baja elastoplástica, que consistía en diseñar las columnas de la planta baja de modo que se formasen rótulas plásticas que absorbiesen parte de la energía sísmica. Aunque el concepto de planta baja no se plantea en la actualidad, frecuentemente se diseñan, por razones estéticas, edificios con la planta baja de altura mayor de lo habitual, comportándose, bajo cargas sísmicas, como si tuviera la planta baja flexible.

El primer edificio del mundo con aislamiento de base mediante elastómeros se realizó en Skopje, Macedonia, en el 1969, después de que un terremoto destruyera la ciudad en 1963. Se utilizaron bloques de caucho natural sin refuerzo. El neopreno zunchado aún no estaba muy desarrollado.

Los apoyos de goma de alta disipación de energía (HDRB) se desarrollaron en California en 1985 por el profesor Jim Kelly, de la Universidad de Berkeley.

Alga fue la primera en aplicar en Europa esta tecnología en 1987 para el edificio Telecom de Ancona, proyecto del Ingeniero Giancarlo Giuliani, con el asesoramiento del profesor Kelly.

Los apoyos de goma-plomo (LRB) se desarrollaron por primera vez en Nueva Zelanda en el 1974 pero fueron introducidos en Europa después del HDRB.

Los apoyos antisísmicos de péndulo deslizante se basan en una idea desarrollada en EE.UU. en los años 80.

Estos ejemplos nos dan una idea de lo reciente y actual que es el diseño antisísmico, asistiendo en los últimos años al diseño y creación de un gran número de dispositivos con funciones muy variadas.

b. Normativa sismorresistente

BASES DE PROYECTO

El planteamiento estructural ante eventos sísmicos viene determinado por las normas existentes. En España la norma sismorresistente se publica en dos partes, separando General y edificación (NCSE) por un lado y Puentes (NCSP) por otro.

La norma española, como la mayoría de las normas actuales, presentan dos niveles de acción sísmica y por lo tanto dos niveles de exigencia para la estructura. Distinguimos entre el sismo frecuente de cálculo y el sismo último de cálculo.

- **Sismo último de cálculo:** Denominamos sismo último de cálculo a multiplicar la acción del sismo básico por el factor de importancia γ_I . El sismo básico es un sismo de baja probabilidad de ocurrencia, para un periodo de retorno de 500 años (el recogido en el mapa de peligrosidad sísmica), por lo tanto, dependiendo de la importancia del puente, disminuirá la probabilidad de ocurrencia de este tipo de evento. El puente debe soportar el sismo último de cálculo sin que se produzca colapso. Después de que ocurra el evento sísmico de estas características, el puente mantendrá su configuración y una capacidad resistente residual suficiente para permitir el tráfico de emergencia, aunque los daños ocasionados pueden ser importantes de forma local o global. Los puentes podrán proyectarse para que su comportamiento bajo la acción del sismo último de cálculo sea dúctil, de ductilidad limitada o esencialmente elástico.
- **Sismo frecuente de cálculo:** Denominamos sismo frecuente de cálculo a multiplicar la acción del sismo frecuente por el factor de importancia γ_I . El sismo frecuente es un sismo de alta probabilidad de ocurrencia, para un periodo de retorno de 100 años, por lo tanto, dependiendo de la importancia del puente, disminuirá la probabilidad de ocurrencia de un sismo de este tipo. El puente debe soportar el sismo frecuente de cálculo, pudiéndose causar únicamente daños menores para los que no será necesario acometer reparaciones inmediatas ni restringir el tráfico sobre el puente después de un evento sísmico de esas características. El comportamiento de los puentes bajo la acción del sismo frecuente de cálculo deberá ser elástico.

También se cuenta en la norma con un **sismo de construcción**, que será de aplicación en los casos en que haya que tener en cuenta la acción sísmica durante la construcción. En esos casos, se tomará el sismo correspondiente a un periodo de retorno no menor de cinco veces la duración de la etapa constructiva. El comportamiento de los puentes durante la construcción bajo la acción de este sismo podrá ser dúctil, de ductilidad limitada o esencialmente elástico.

Normalmente para puentes de una importancia normal, el factor de importancia γ_I es 1, por lo que la probabilidad de ocurrencia de un evento sísmico durante la vida útil de la estructura (proyectada normalmente para 100 años) es de un 20% para el sismo último de cálculo (periodo de retorno de 500 años) y de un 100% para el sismo frecuente de cálculo (periodo de retorno de 100 años).

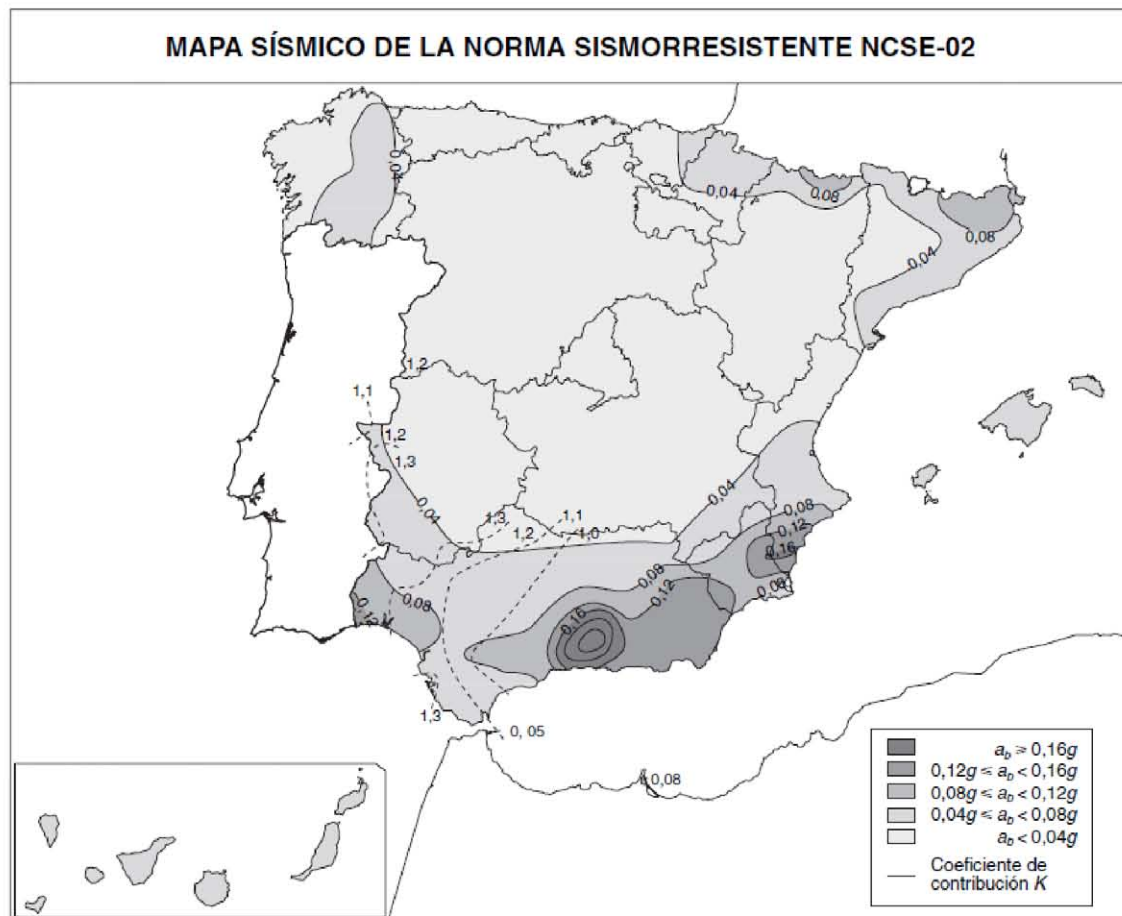
Para puentes de una importancia especial, el factor de importancia γ_I es 1,3. Por lo que la probabilidad de ocurrencia de un evento sísmico de tales características disminuye. Basándonos en la formulación del coeficiente $\gamma_{II} = (PR/500)^{0,4}$ en el que se relaciona un coeficiente que multiplica la acción del sismo básico con el periodo de retorno, deducimos que para un coeficiente de 1,3 el periodo de retorno es aproximadamente el doble, 1000 años para el sismo último de cálculo y 200 años para el sismo frecuente de cálculo. La probabilidad de ocurrencia de un evento sísmico durante la vida útil de la estructura (proyectada normalmente para 100 años) es de un 10% para el sismo último de cálculo (periodo de retorno de 1000 años) y de un 50% para el sismo frecuente de cálculo (periodo de retorno de 200 años).

Para el cálculo del sismo de construcción usaremos por tanto la formulación anterior de γ_{II} , para un periodo de retorno superior a 5 veces la duración de la obra, mientras que el factor de importancia γ_I es 1. En todo caso la probabilidad de ocurrencia del evento sísmico durante la construcción de la estructura es igual o inferior a un 20%.

Como hemos dicho anteriormente, los sismos últimos de cálculo y de construcción permiten un comportamiento dúctil, consiguiendo una reducción importante de la acción sísmica mediante la formación de rótulas plásticas que permiten grandes desplazamientos, disipando energía por histéresis. Esta reducción sísmica se produce a costa de un daño en la estructura, aunque las secciones donde se forman las rótulas estén adecuadamente dimensionadas y confinadas, con capacidad suficiente después del sismo para resistir acciones permanentes, pero requiere reparaciones costosas para restituir el recubrimiento y sellar fisuras.

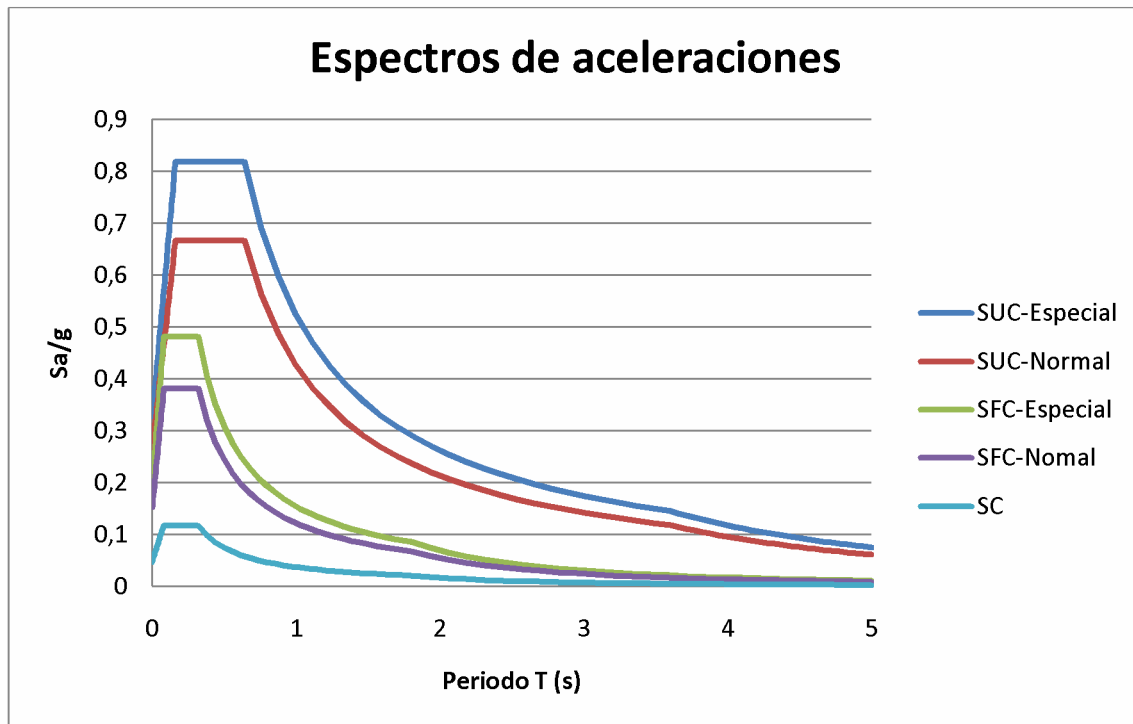
En primer lugar prima evitar el colapso y con ello la pérdida de vidas humanas, pero en segundo lugar prima un equilibrio entre lo económico y lo funcional, en el que tenemos un 20% o un 10% de posibilidades de perder la funcionalidad de la estructura con un gran coste de reparación. Aquí entran en juego los dispositivos antisísmicos, ya que lo que pretenden es aislar la estructura y disipar energía, reduciendo la acción sísmica sobre la misma, y de este modo disminuyendo costes materiales en elementos estructurales. Por otro lado también se puede pretender evitar un comportamiento plástico en la estructura para los sismos último de cálculo, evitando unos daños y un coste adicional en caso de que se produzca dicho evento sísmico. Para ello estos elementos tienen que ser económicamente rentables.

La aceleración básica en España viene recogida en la norma NCSE-02, en el **mapa de peligrosidad sísmica**:



Aunque España tiene un índice de peligrosidad sísmica moderada, sobre todo si lo comparamos a otras regiones europeas (Italia, Grecia o Turquía), hay ciertas zonas que registran una mayor actividad, como son el sur, sureste y suroeste de la Península, Pirineos y costa de Cataluña y parte de Galicia, siendo de una peligrosidad especial con una intensidad media-alta el entorno de Granada, Alicante, Murcia y Almería. Para los cálculos posteriores hemos tomado como referencia la ciudad de Granada, con una aceleración básica de 0,23g.

Como ejemplo, vamos a mostrar superpuestos los espectros de aceleraciones de los tres tipos de sismos descritos anteriormente (sismo último de cálculo, sismo frecuente de cálculo y sismo de construcción) para un puente de importancia normal y especial. Este ejemplo es el tomado para la ciudad de Granada, con un suelo tipo III y un amortiguamiento del 5%. La duración de la construcción la estimamos en 1 año.



Observamos cómo las acciones del sismo frecuente de cálculo son cerca de la mitad de las acciones del sismo último de cálculo, de ahí que se permita el comportamiento dúctil para el sismo último de cálculo.

INFLUENCIA DEL TIPO DE TERRENO

El espectro de aceleraciones depende de las características geotécnicas del terreno de cimentación.

En la norma española NCSP-07 vamos a distinguir cuatro tipos de terrenos. Estos son los siguientes:

	Descripción	Velocidad de propagación de las ondas elásticas transversales o de cizalla	Coefficiente C
Terreno tipo I	Roca compacta, suelo cementado o granular muy denso	$v_s \geq 750 \frac{m}{s}$	1,0
Terreno tipo II	Roca muy fracturada, suelo granular denso o cohesivo duro	$750 \frac{m}{s} \geq v_s \geq 400 \frac{m}{s}$	1,3
Terreno tipo III	Suelo granular de compacidad media, o suelo cohesivo de consistencia firme a muy firme	$400 \frac{m}{s} \geq v_s \geq 200 \frac{m}{s}$	1,6
Terreno tipo IV	Suelo granular suelto, o suelo cohesivo blando	$v_s \leq 200 \frac{m}{s}$	2,0

El coeficiente C dependerá de las características de los primeros 30 metros bajo la superficie. En el caso de que los primeros 30 metros no estén formados por un único tipo de terreno, el valor medio será el obtenido al ponderar los coeficientes C_i de cada estrato con su espesor e_i , en metros (m), mediante la expresión:

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

Con el valor de C calcularemos el coeficiente de amplificación del terreno S. Este valor varía dependiendo no solamente del terreno, sino de la aceleración básica de la zona (a_b) multiplicada por el coeficiente dimensional de riesgo ($p=\gamma_I \cdot \gamma_{II}$).

En terrenos con una aceleración básica baja donde $p \cdot a_b < 0,1g$, la amplificación de la aceleración por influencia del terreno es $S=C/1,25$, mientras que en terrenos con una aceleración básica alta donde $p \cdot a_b > 0,4g$, la amplificación de la aceleración por influencia del terreno es nula, ya que $S=1,0$.

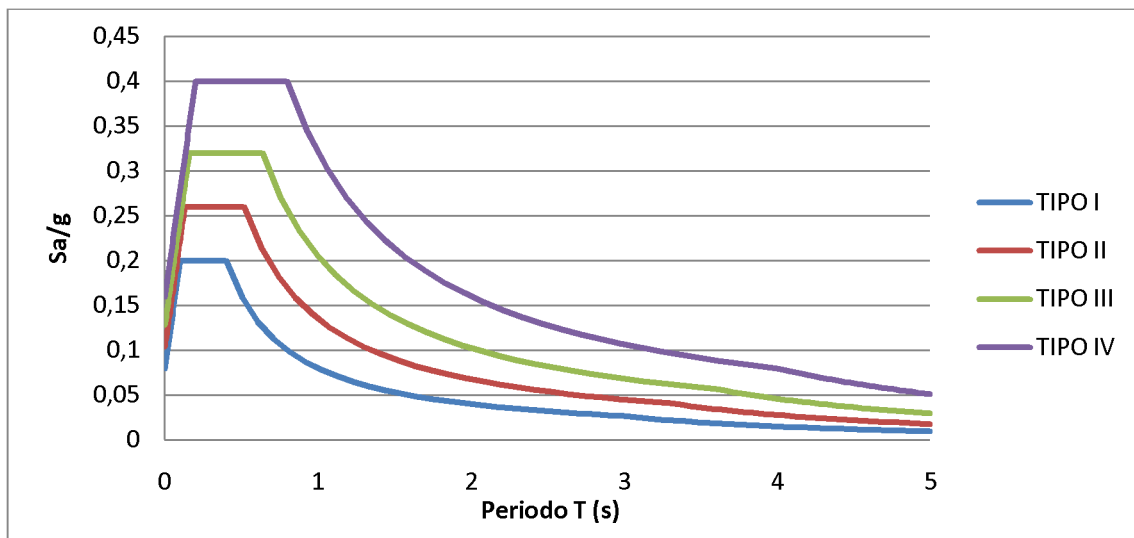
El coeficiente C también afecta al periodo, de manera que en los terrenos de peor calidad, todo el espectro se ve desplazado hacia la derecha, teniendo mayores aceleraciones para los mismos periodos.

Con esto podemos resumir que en zonas con una aceleración básica pequeña y un terreno blando, el espectro de aceleraciones aumenta en todos los sentidos: aumenta la aceleración máxima y se desplaza hacia la derecha aumentando la aceleración en los periodos altos.

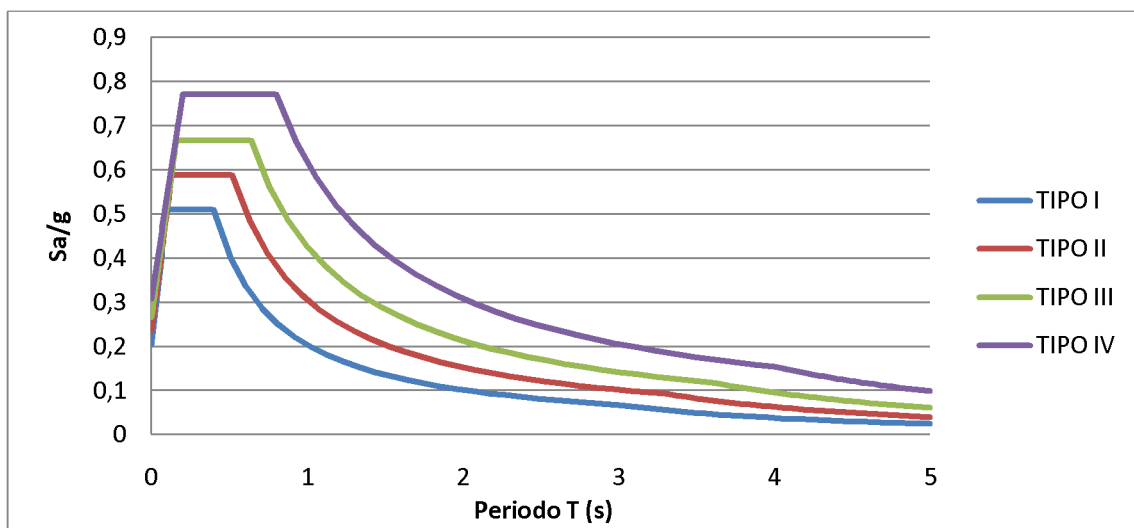
Para una aceleración básica muy alta, las aceleraciones máximas alcanzadas son idénticas, pero el espectro de aceleraciones se desplaza a la derecha para los terrenos más blandos, aumentando la aceleración para los periodos altos (no así en los periodos bajos).

Vamos a tomar tres ejemplos, uno con una aceleración básica baja de $0,1g$, otro con la aceleración que hemos tomado como ejemplo, la ciudad de Granada, con $0,23g$, y por último una aceleración alta, de $0,4g$, (no existe para ningún punto de España). En ellos comparamos todos los tipos de terreno. Tomamos un coeficiente adimensional de riesgo $p=1$. El amortiguamiento es del 5%.

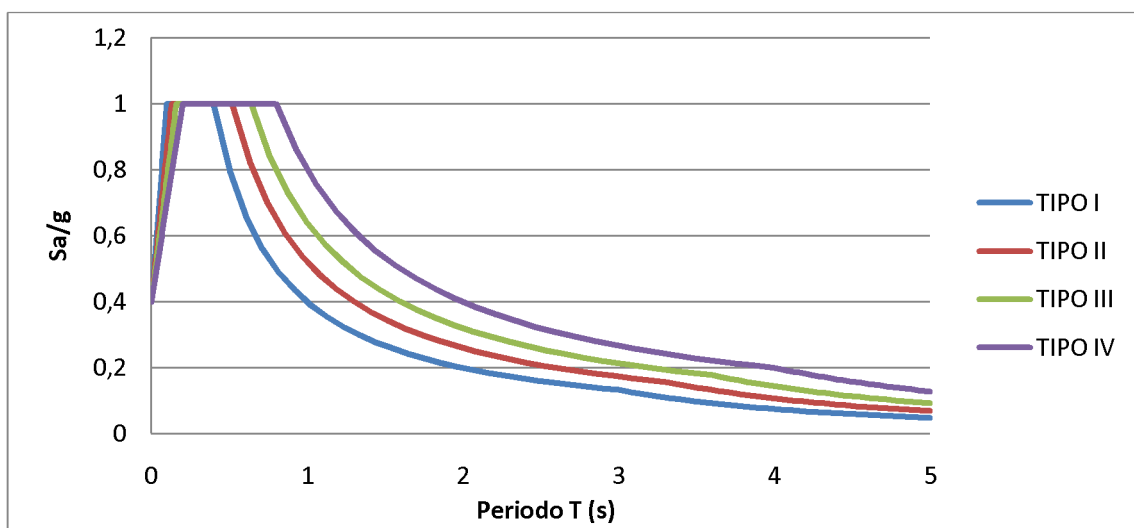
- Espectro de aceleraciones ($a_b=0,1g$)



- Espectro de aceleraciones ($a_b=0,23g$)



- Espectro de aceleraciones ($a_b=0,4g$)

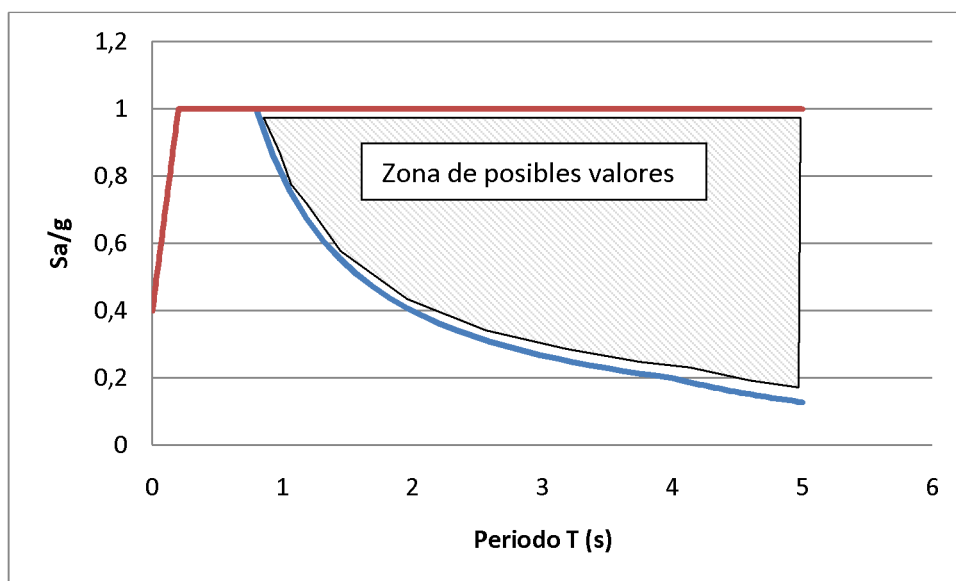


Tal como explicamos anteriormente, todos los espectros de aceleraciones aumentan la aceleración en los periodos altos para los terrenos blandos. Esto afecta a la concepción de las estructuras con dispositivos antisísmicos, ya que estos dispositivos aumentan el periodo propio de la estructura, por lo que dependiendo del tipo de terreno, puede que no consigamos reducir la acción sísmica en la cantidad deseada usando un cierto dispositivo antisísmico. Podemos concluir que el tipo de terreno puede condicionar fuertemente el uso o no de los dispositivos antisísmicos, o el uso de uno u otro dispositivo.

Observamos en los espectros anteriores, que para un mismo periodo podemos tener hasta 4 veces mayor aceleración en un terreno blando que en uno duro ($a_b=0,1g$). En el caso de una aceleración básica elevada ($a_b=0,4g$) la aceleración para ciertos periodos es más del doble en un terreno blando que en un terreno duro.

Por ejemplo, en un terreno duro, podemos usar un dispositivo antisísmico que nos dé un periodo propio, el cual nos lleve a la parte baja del espectro de aceleraciones. Pero ese mismo dispositivo usado en un terreno blando puede no ser suficiente para salir de la meseta con las aceleraciones máximas.

Según la norma, para los casos especiales en los que el valor de C sea mayor de 1,8, el espectro de respuesta definido con las reglas anteriores puede no ser aplicable a las construcciones con un periodo fundamental mayor de T_B (periodo donde finaliza la aceleración máxima del espectro), por lo que para todos los periodos superiores al anterior, la aceleración del espectro será igual a la máxima, a menos que se determine un espectro de respuesta específico del desplazamiento. En el siguiente gráfico vemos el espectro de aceleraciones para un terreno tipo IV ($C=2$).



DIFERENCIA ENTRE SISMOS DE FOCO CERCANO Y FOCO LEJANO

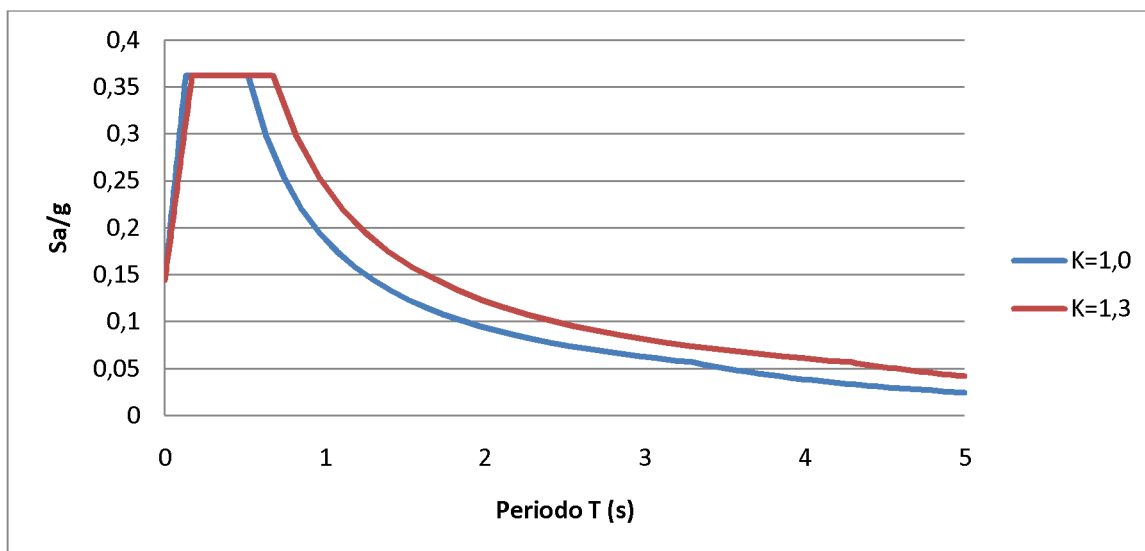
Los movimientos debidos a un terremoto pueden tener un origen lejano o un origen cercano. En ambos casos el terremoto varía sus características debido a la distancia al epicentro, por lo que no existe un único tipo de espectro, sino que varía dependiendo de la distancia al origen del sismo.

En España la norma NCSP-07 considera un coeficiente de contribución K , que refleja las características diferenciadoras de la sismicidad registrada en el territorio nacional por los terremotos producidos en el Cabo de San Vicente y el resto, de foco lejano y de foco cercano, respectivamente.

La zona suroeste de la península (Cádiz, Huelva) se encuentra fuertemente afectada por los terremotos producidos en la zona del Cabo de San Vicente, como el famoso terremoto de Lisboa de 1755. Por ello introducimos el coeficiente de contribución K que desplaza el espectro de aceleraciones hacia la derecha, siendo las aceleraciones mayores para los periodos más altos.

En la localidad de Ayamonte tenemos una aceleración básica de $0,14g$, la mayor producida por foco lejano en España. El coeficiente de contribución K es igual a $1,3$.

En el siguiente gráfico comparamos dos sismos de $0,14g$, uno con un coeficiente de contribución $K=1$ y otro $K=1,3$, para comparar las diferencias entre sismos de foco cercano y lejano. Hemos tomado un terreno tipo II, importancia normal y un índice de amortiguamiento del 5%.



Aunque en España la diferencia no es muy grande, tenemos que conocer este comportamiento y tratarlo en consecuencia, ya que influirá en la elección del dispositivo antisísmico a elegir. Debe considerarse que habrá que alcanzar periodos mayores para una misma disminución de la acción sísmica en el caso de terremotos producidos por foco lejano.

c. Métodos convencionales de diseño antisísmico

Los métodos convencionales de diseño antisísmico son las bases de proyecto y diseño usadas habitualmente en las estructuras situadas en zonas sísmicas. Enumeramos cada uno de ellos, excepto los dispositivos antisísmicos que serán explicados y ampliados en los apartados posteriores.

REGULARIDAD GEOMÉTRICA Y RESISTENTE

El puente debe de ser lo más regular y homogéneo posible, siempre que la geografía lo permita. Se debe comenzar el diseño teniendo en cuenta las limitaciones producidas por el sismo, siendo éste el principal condicionante. Algunas de las características estructurales idóneas de un puente en zona sísmica son:

- Las pilas deben tener una altura similar. La diferencia de altura supone diferentes rigideces y por tanto, la concentración de daños en las pilas más rígidas.
- Las pilas deberían tener la misma rigidez y resistencia en dirección longitudinal y transversal.
- Las luces de los vanos deben ser moderadas y regulares, ya que las luces grandes implican grandes cargas verticales.
- Los tableros deben ser preferentemente continuos, con menor número de juntas posibles.
- Los puentes deben ser preferiblemente rectos, ya que tienen una respuesta menos compleja.

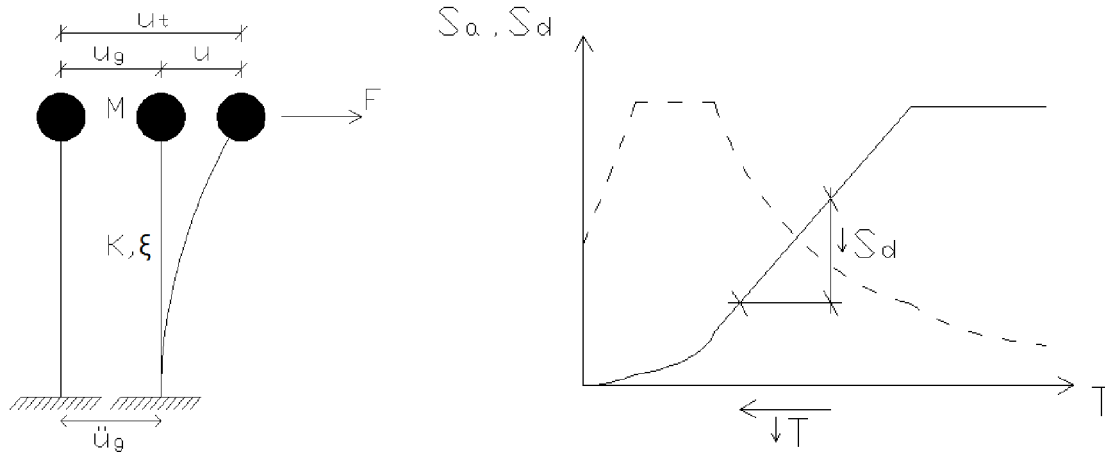
DISMINUCIÓN DE MASAS

El tablero, en general, no está incorporado al esquema resistente del puente frente a acciones sísmicas. Las acciones del sismo son resistidas por la infraestructura.

Es evidente minimizar el peso propio de las soluciones en hormigón, o ir a soluciones metálicas o mixtas, más ligeras, pues la masa está en relación directa con la acción sísmica.

Considerando que el puente lo modelamos mediante un sistema de un grado de libertad, si tenemos unas pilas con una misma rigidez ($K=cte$) y variamos el peso propio del tablero, tenemos un cambio en el periodo propio de vibración de la estructura.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K}} \rightarrow A \downarrow M \leftrightarrow \downarrow T$$



Al disminuir la masa disminuye el periodo. A menor periodo (\$T\$), nos desplazamos a la izquierda del espectro de aceleraciones y de desplazamientos, disminuyendo el desplazamiento máximo producido en la estructura debido al sismo.

Podemos concluir que a menor masa tenemos menores esfuerzos en las pilas, ya que están en función de la rigidez (\$K=cte\$) y el desplazamiento (\$S_d\$).

$$\text{Fuerza estática equivalente} \rightarrow F = K \cdot S_d \quad \downarrow$$

$$\text{Máximo cortante en la base de la estructura} \rightarrow V = K \cdot S_d$$

$$\text{Máximo momento de la base de la estructura} \rightarrow M = K \cdot S_d \cdot h$$

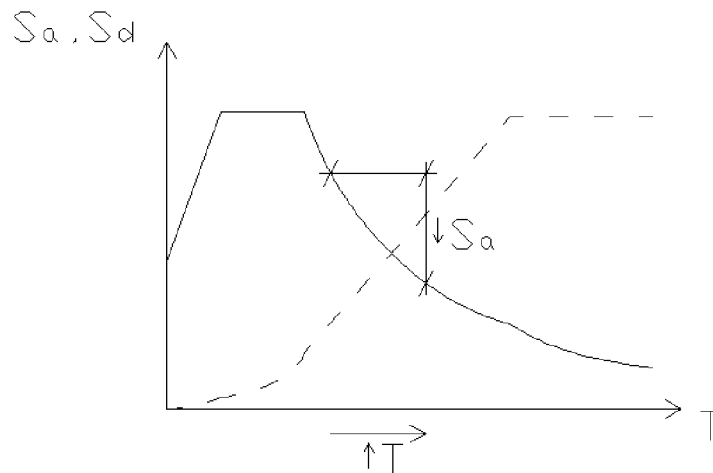
DISMINUCIÓN DE LA RIGIDEZ

Necesitamos disminuir la rigidez de las pilas, es beneficioso ir a soluciones flexibles, no conviene empotrar la pila en el tablero.

Al igual que en el punto anterior, esta vez para realizar la comprobación, mantenemos la masa constante (\$M=cte\$). De esta manera estudiamos lo conveniente de disminuir la rigidez.

Considerando que el puente lo modelamos mediante un sistema de un grado de libertad, si tenemos unas pilas con menor rigidez (\$K\$) y mantenemos constante el peso propio del tablero tenemos un cambio en el periodo propio de vibración de la estructura.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K}} \rightarrow A \downarrow K \leftrightarrow \uparrow T$$



Al disminuir la rigidez aumenta el periodo. A mayor periodo (T) nos desplazamos a la derecha del espectro de aceleraciones, disminuyendo la aceleración máxima producida en la estructura debido al sismo.

Podemos concluir que a menor rigidez tenemos menores esfuerzos en las pilas, ya que están en función de la masa ($M=\text{cte}$) y la aceleración (S_a).

$$\text{Fuerza estática equivalente} \rightarrow F = M \cdot S_a \quad \downarrow$$

$$\text{Máximo cortante en la base de la estructura} \rightarrow V = M \cdot S_a$$

$$\text{Máximo momento de la base de la estructura} \rightarrow M (\text{Momento}) = M \cdot S_a \cdot h$$

DUCTILIDAD

Tal como expresamos en el apartado de la normativa sismorresistente, para el sismo último de cálculo se admite que los puentes puedan comportarse como estructuras dúctiles. Con el comportamiento dúctil se puede conseguir que la estructura disipe energía por la formación de rótulas plásticas, con el consiguiente daño producido, proyectándose el puente con unos esfuerzos debidos al sismo menores que los que corresponderían a la estructura con un comportamiento elástico.

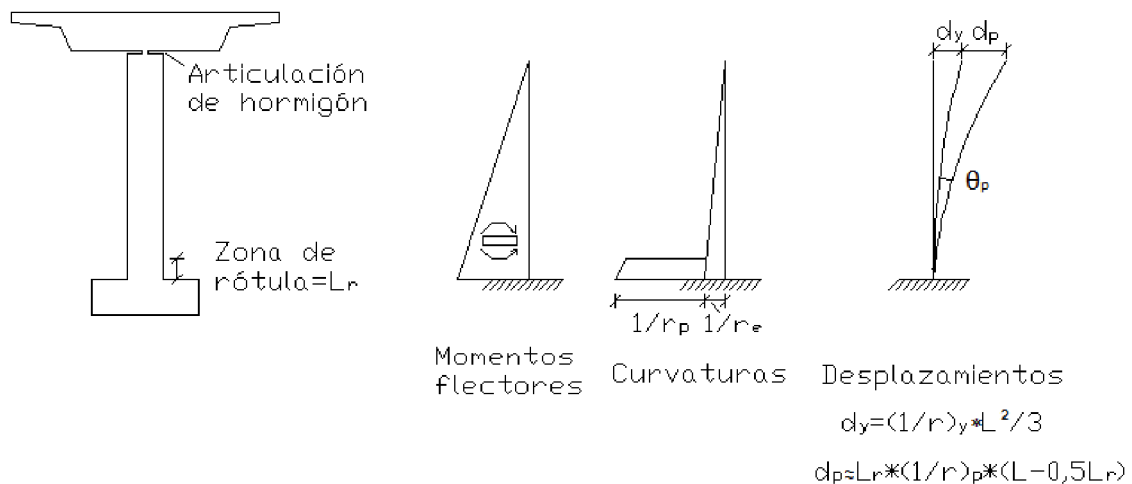
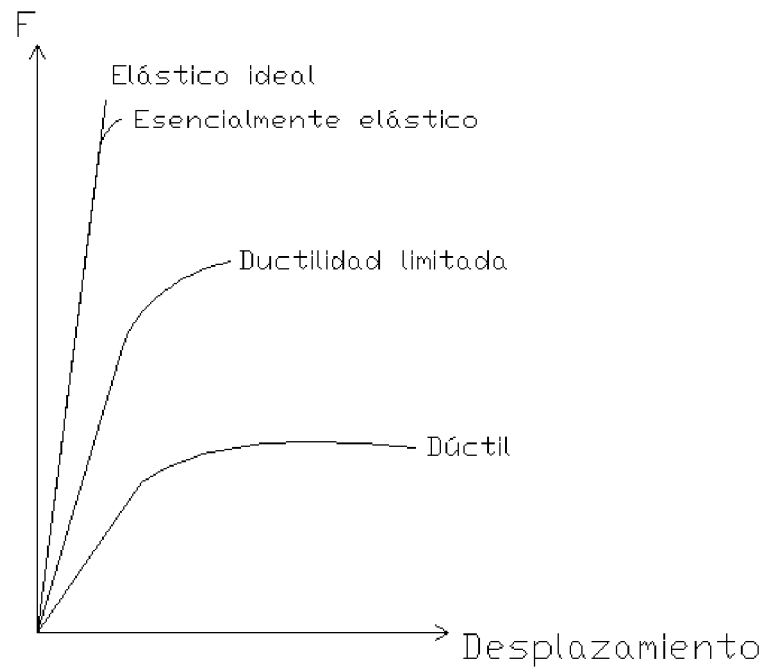
Los puentes para los que se desea un comportamiento dúctil se proyectarán, en general, de forma que las rótulas plásticas aparezcan en las pilas, fundamentalmente en zonas accesibles para la inspección y reparación.

El tablero debe permanecer dentro del rango elástico. Únicamente se permite la formación de rótulas plásticas en las losas de continuidad entre vanos isostáticos de vigas prefabricadas.

El comportamiento dúctil de la estructura debe cumplir una serie de condiciones, dadas en la norma NCSP-07:

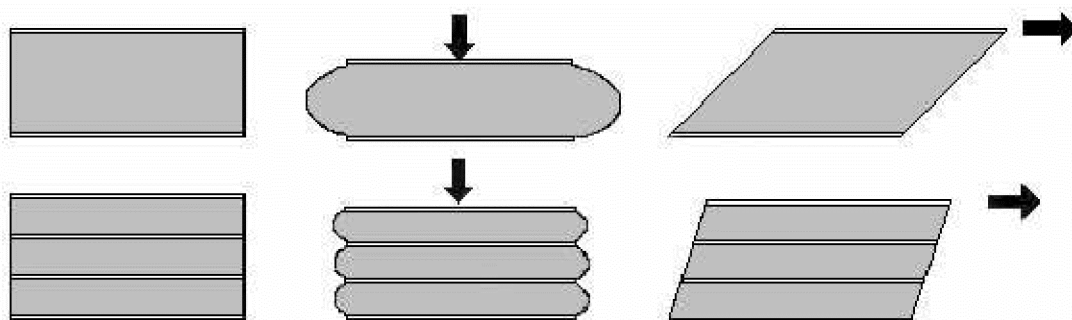
- Condición de resistencia
Debe comprobarse que las rótulas plásticas disponen de una resistencia adecuada, tanto a flexión como a cortante, y que el resto de las zonas de la estructura, fuera de las rótulas plásticas, disponen también de resistencias adecuadas, todo ello de acuerdo con los criterios de proyecto por capacidad definidos en la norma.
Deben tenerse en cuenta los efectos de segundo orden inducidos en las pilas, debido a los desplazamientos globales de la estructura.
- Condición de desplazamientos
Debe comprobarse que la longitud de entrega en apoyos es suficiente para evitar descalces y que la anchura de juntas es suficiente para evitar el martilleo entre los distintos elementos.
- Condición de ductilidad
Debe garantizarse una ductilidad local adecuada en la zona en la que se admite la formación de rótulas plásticas.

En el siguiente diagrama se muestra la diferencia entre los comportamientos admitidos en puentes. Para el mismo terremoto, la fuerza F que actúa sobre un puente durante el sismo es máxima si el comportamiento del puente es idealmente elástico, en este caso la deformación es mínima. Si se admite un comportamiento dúctil, la fuerza que actúa es mínima y la deformación de la estructura es máxima, debido a que se minimiza el efecto de la acción con la formación de las rótulas plásticas, cuyo comportamiento dúctil supone grandes deformaciones.

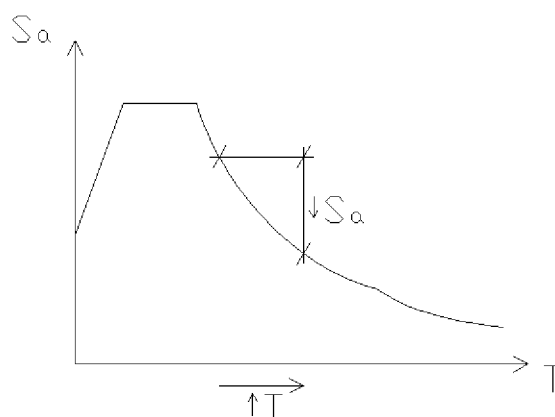


AISLAR (Neoprenos convencionales)

Aislar con dispositivos de apoyo de neopreno zunchado es el método más sencillo y difundido del mundo. El apoyo de neopreno zunchado está compuesto por capas alternas de goma y placas de acero unidas entre sí por vulcanización. La rigidez del apoyo es controlada por el espesor de las capas de goma. Mientras más gruesas son estas capas, más flexible es el apoyo en dirección horizontal. En cambio la rigidez vertical del apoyo es controlada por la alta rigidez en planta de las placas de acero que inhibe la expansión lateral de la goma resultante de la presión vertical.



Con el uso de los neoprenos convencionales permitimos un desplazamiento relativo. Son elementos flexibles que ayudan a no transmitir la vibración (aislar), por lo que aumentan el periodo de vibración de la estructura y en consecuencia una disminución de la acción sísmica. La flexibilidad que confieren los neoprenos hace casi imposible la formación de rótulas plásticas y parte de la deformación de la pila se gasta en deformar a los neoprenos.



En puentes con longitudes medias, son muy usados para minimizar el efecto de los cambios de temperatura y efectos reológicos de fluencia y retracción. Hay que tener en cuenta que los neoprenos aumentan su rigidez frente a acciones dinámicas.

Los apoyos de neopreno convencionales no tienen la propiedad de disipar la energía, nos dan un índice de amortiguamiento de un 2% a un 5%. Normalmente, para sismos importantes este sistema necesita una amortiguación adicional, dada por la combinación con amortiguadores, para formar un sistema apropiado con un índice de amortiguamiento del 10 al 20%.

Los neoprenos usados en zonas sísmicas importantes deben ser anclados, para evitar el levantamiento de la estructura de los aparatos de apoyo.

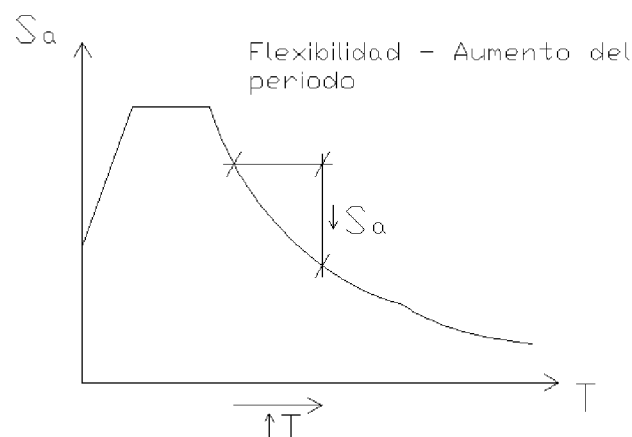
Existen apoyos elastoméricos de alto amortiguamiento, pero que debido a sus características, los estudiamos brevemente en el apartado 2.e como dispositivos antisísmicos.

d. Descripción funcional de los dispositivos antisísmicos

En el siguiente estudio de los dispositivos antisísmicos, nos vamos a centrar en los dispositivos utilizados en puentes. Estos dispositivos usan dos conceptos básicos, la flexibilidad y la disipación de energía:

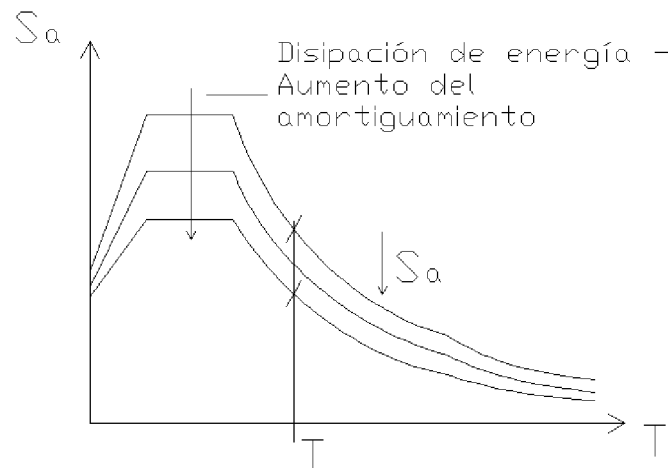
- **Flexibilidad:** Un apoyo flexible produce un aumento en el periodo de vibración de la estructura, tal como se ha explicado con anterioridad, reduciendo la aceleración transmitida a la estructura, aunque la reducción depende del periodo inicial (sin dispositivos) y de la forma del espectro. El aumento de la flexibilidad conlleva grandes desplazamientos, por lo que lo ideal sería usar el amortiguamiento para reducir y controlar los desplazamientos.

La reducción de la acción sísmica en la estructura tiene como ventaja inmediata la reducción del coste de la estructura. Cuanto mayor es la sismicidad de la zona, mayor será el ahorro. Por lo tanto, el aislamiento sísmico es conveniente desde un punto de vista económico.



- **Disipación de energía:** Hay muchas formas de producir la disipación de energía, mediante algún amortiguador histerético, mediante disipadores mecánicos que utilizan la deformación plástica (plomo) para conseguir la histéresis, o la fricción entre dos materiales. En todos los casos se provee un amortiguamiento adicional. La disipación de energía produce una disminución generalizada de la acción sísmica y sus desplazamientos.

De acuerdo con la normativa europea, si en una estructura aislada el amortiguamiento equivalente es inferior al 30%, la estructura puede ser calculada como lineal equivalente (más adelante se explicará el procedimiento de cálculo), simplificando enormemente la modelización y el cálculo de toda la estructura.



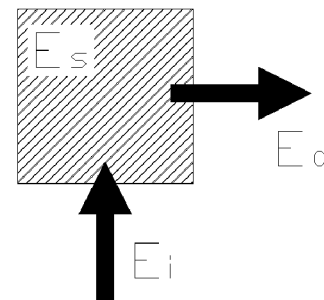
Los dispositivos antisísmicos se basan en reducir efectivamente la energía inducida en la estructura (E_i) por el movimiento del terreno a través de la cimentación.

La cantidad de la energía almacenada en la estructura (E_s) tiene que ser lo más baja posible para evitar daños. Por lo tanto el valor de la energía disipada (E_d) tiene que ser elevada.

E_s = Energía almacenada dentro de la estructura

E_d = Energía disipada en la estructura

E_i = Energía inducida en la estructura



Ecuación de balance de energía para las estructuras:

$$E_i \leq E_s + E_d$$

$$E_i \leq E_e + E_k + E_h + E_v = \int -m \ddot{x}_G dx$$

Donde:

E_e = Energía de deformación elástica

E_k = Energía cinética

E_h = Energía disipada por la deformación histerética o plástica

E_v = Energía disipada por el dispositivo o amortiguador

m = Masa de la estructura aislada

x_G = desplazamiento absoluto del terreno ($\ddot{x}_G$ es la aceleración)

La parte de la energía E_h de la E_d debido a la deformación plástica de la estructura tiene que permanecer baja, ya que esta forma de disipación de energía causa estructuras dóciles y grietas.

El drástico aumento del valor de la energía de fenómenos viscosos (E_v) es la última oportunidad para controlar el balance energético de la estructura. Cabe señalar que E_v está directamente asociado al dispositivo antisísmico, que tiene que ser altamente eficiente.

Mostramos los efectos del terremoto sobre una masa oscilante. Para este caso la ecuación del movimiento válida es:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx + h(x) = -m\ddot{x}_G$$

Integrando los términos de la ecuación con respecto a x , resulta:

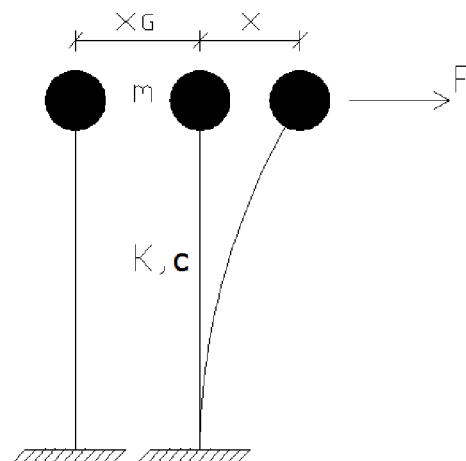
$$\int m\ddot{x} dx = \int m \frac{d\dot{x}}{dt} dx = \int m\dot{x} d\dot{x} = \frac{1}{2} m\dot{x}^2 = E_k$$

$$\int Fx dx = \int c \dot{x} dx = \int c\dot{x}^2 dt = E_v$$

$$\int kx dx = \int \frac{1}{2} kx^2 = E_e$$

$$\int h(x) dx = E_h$$

$$\int -m\ddot{x}_G dx = E_i$$



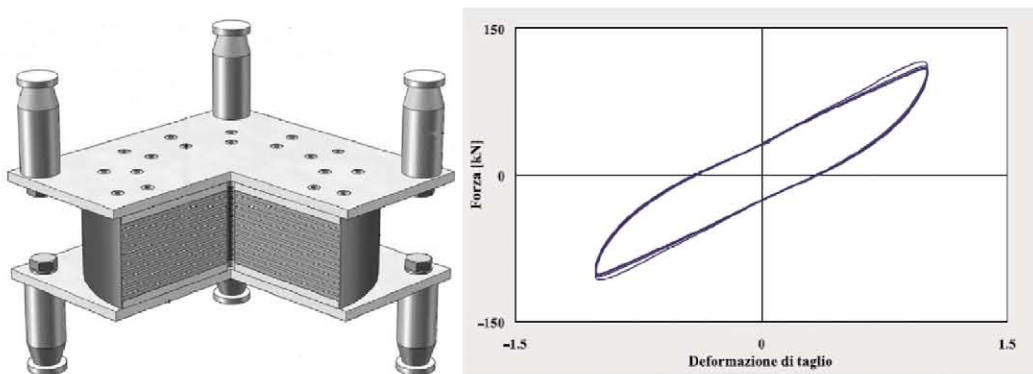
Los dispositivos suelen ser aisladores o disipadores, o ambas cosas a la vez. Tenemos una amplia lista de dispositivos antisísmicos utilizados habitualmente en puentes.

Realizamos una breve descripción de cada uno de ellos:

e. Dispositivos antisísmicos para puentes

• APOYO ELASTOMÉRICO DE ALTO AMORTIGUAMIENTO

Los apoyos elastoméricos están constituidos por capas alternas de acero y de elastómero vinculados por la vulcanización. Su comportamiento puede ser modelado como lineal, mediante la rigidez equivalente y coeficiente de amortiguamiento viscoso equivalente. Por lo general son hechos de elastómeros de alto amortiguamiento, es decir, con coeficiente de amortiguamiento viscoso equivalente entre el 10 y el 15% a una deformación tangencial del 100%. Son una evolución de los neoprenos convencionales con un mejor comportamiento ante eventos sísmicos. Van anclados superior e inferiormente.

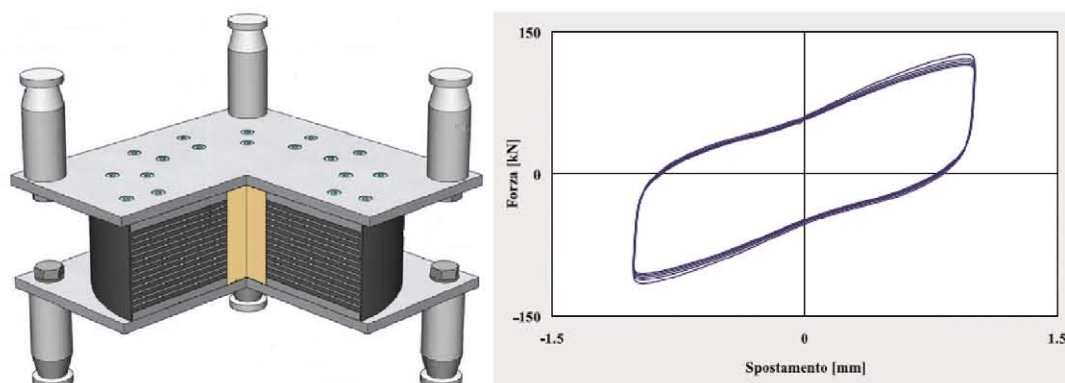


En las imágenes, el esquema del dispositivo y el diagrama fuerza-deformación en el que observamos el ciclo histerético del apoyo a una frecuencia de 0,5 Hz y deformación tangencial del 100%.

• APOYO ELASTOMÉRICO CON NÚCLEO DE PLOMO

Son apoyos elastoméricos con un núcleo central de plomo en forma cilíndrica. La plasticidad del plomo entrega un amortiguamiento viscoso equivalente de cerca del 30%.

La ley constitutiva de los apoyos es bilineal. En el diseño se pueden utilizar modelos no lineales o lineales equivalentes, en función de los requisitos reglamentarios.

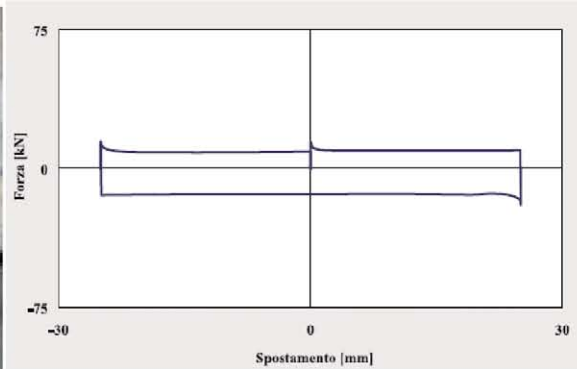


En las imágenes, el esquema del dispositivo y el diagrama fuerza-deformación en el que observamos el ciclo histerético del apoyo a una frecuencia de 0,5 Hz y deformación tangencial del 100%.

- **APOYO DESLIZANTE DE SUPERFICIE PLANA**

Los apoyos deslizantes en superficie plana son dispositivos de apoyo multidireccional con una superficie de deslizamiento de baja fricción. Son siempre utilizados en combinación con otros dispositivos antisísmicos (aislantes o disipadores). No tiene capacidad de recentrado.

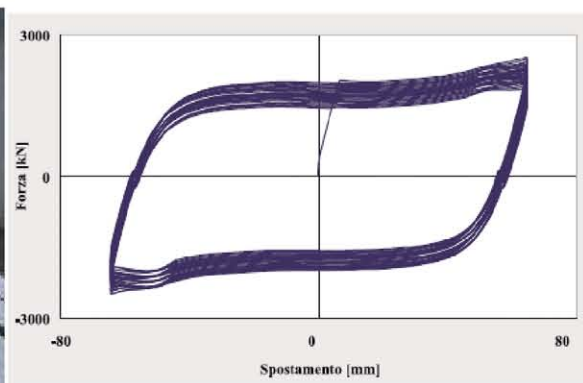
El coeficiente de fricción dinámico es muy bajo, entre el 1 y el 4%, por lo tanto, su contribución a las fuerzas horizontales es casi insignificante. Disminuye cuando aumenta la carga vertical.



En las imágenes, el dispositivo y el diagrama fuerza-desplazamiento, resultado de una prueba estática de fricción (vel. 4 mm/min) de un apoyo a la máxima carga vertical de proyecto (14000 kN), coeficiente de fricción dinámico cercano al 1%.

- **APOYO DESLIZANTE EN SUPERFICIE PLANA CON DISIPADORES**

Estos apoyos constituyen la combinación en un único dispositivo de un aparato de apoyo y un disipador; estos últimos suelen ser disipadores histeréticos de acero y/o disipadores viscosos. Por lo tanto, se caracteriza por una alta capacidad de disipación. El dispositivo de apoyo puede ser multidireccional o unidireccional. El apoyo puede incluir también dispositivos de vínculo dinámico shock transmitters (STU) o dispositivos de fusible mecánico.

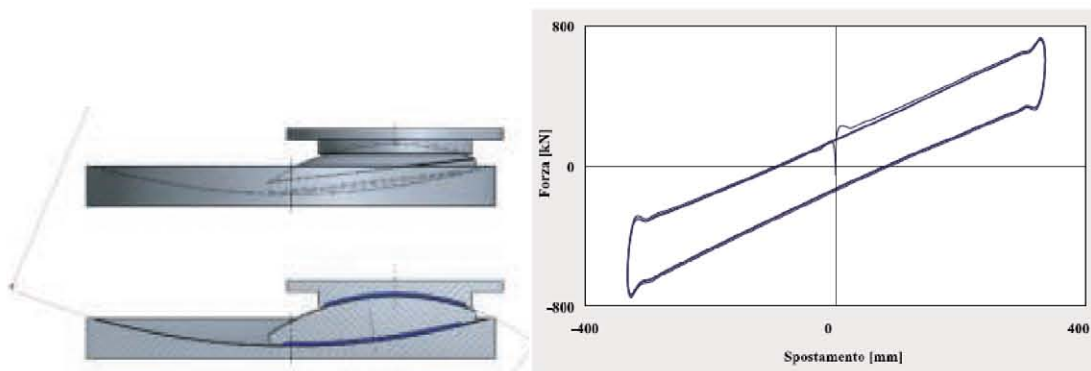


En las imágenes, un apoyo deslizante en superficie plana con un disipador histerético de acero, y un diagrama fuerza-desplazamiento del ciclo histerético del dispositivo.

- **APOYO DESLIZANTE EN SUPERFICIE CURVA (DISPOSITIVO PENDULAR)**

Los apoyos deslizantes en superficie curva usan la fuerza de la gravedad como fuerza de recentrado; el principio de funcionamiento es el del péndulo. La disipación de energía es proporcionada por la fricción de la superficie de desplazamiento principal. Los parámetros de la relación constitutiva bilineal dependerán del radio de curvatura y del coeficiente de fricción.

En el caso de movimiento muy elevado es conveniente el uso de apoyos de doble superficie curva, para ayudar a reducir el tamaño en planta.

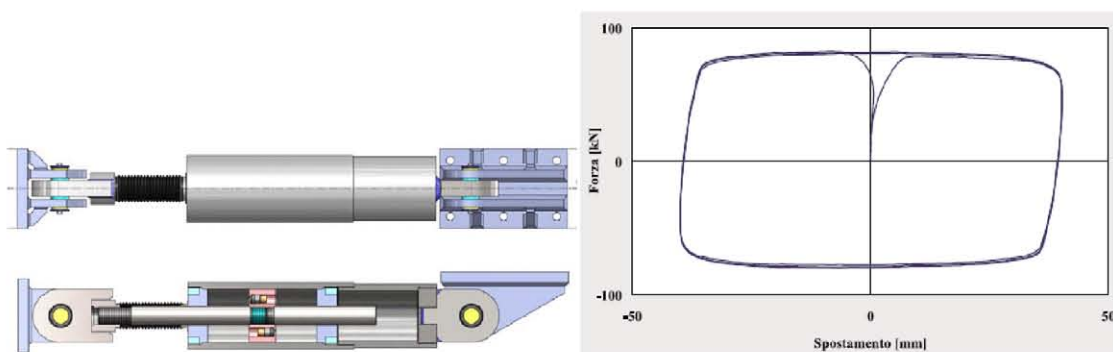


En las imágenes, un dispositivo pendular de doble superficie curva, y su diagrama fuerza-desplazamiento experimental

- **AMORTIGUADOR VISCOSO**

El disipador viscoso es un dispositivo cilindro/pistón en donde la laminación de un fluido de silicona atravesando un circuito hidráulico idóneo permite la disipación de energía.

La típica relación constitutiva fuerza-velocidad que resulta es no lineal. Es decir $F = C \cdot v^\alpha$, donde F es la fuerza, C es la constante de amortiguamiento, v es la velocidad y α es un exponente que describe la propiedad disipativa del amortiguador. Su valor va desde 1 a valores cercanos a 0.

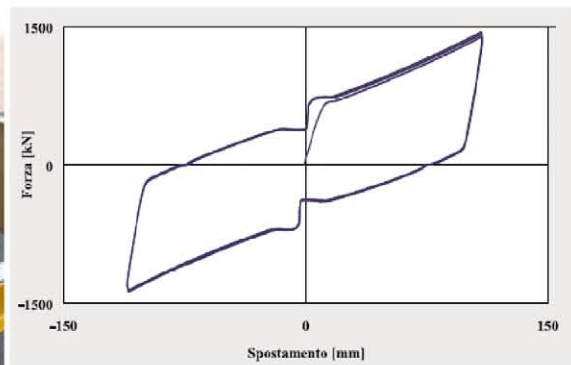


En las imágenes, el esquema de un amortiguador viscoso y su ciclo fuerza-desplazamiento para una prueba con carga sinusoidal.

- **AMORTIGUADOR VISCOSO CON RECENTRADO**

El disipador viscoso con recentrado es una evolución del dispositivo viscoso, en el que se añade un muelle, por lo que el dispositivo es caracterizado por la relación constitutiva $F = F_0 + K \cdot x + C \cdot v^\alpha$, donde F_0 es la posible fuerza de precarga, K es la rigidez, x el desplazamiento, C es la constante de amortiguamiento, v es la velocidad y α es un exponente que describe la propiedad disipativa del amortiguador.

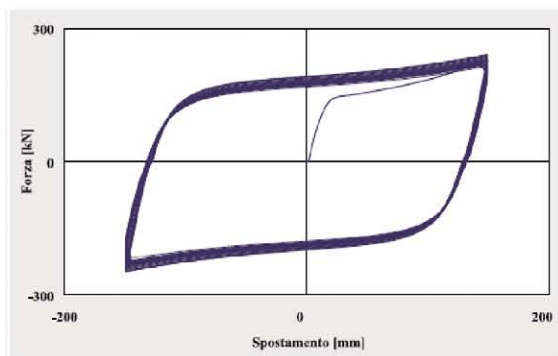
La fuerza de precarga puede ser útil para evitar movimientos por la acción horizontal de servicio.



En las imágenes, uno de estos dispositivos y el diagrama fuerza-desplazamiento experimental de un dispositivo sin fuerza de precarga.

- **DISPOSITIVO HISTERÉTICO DE ACERO**

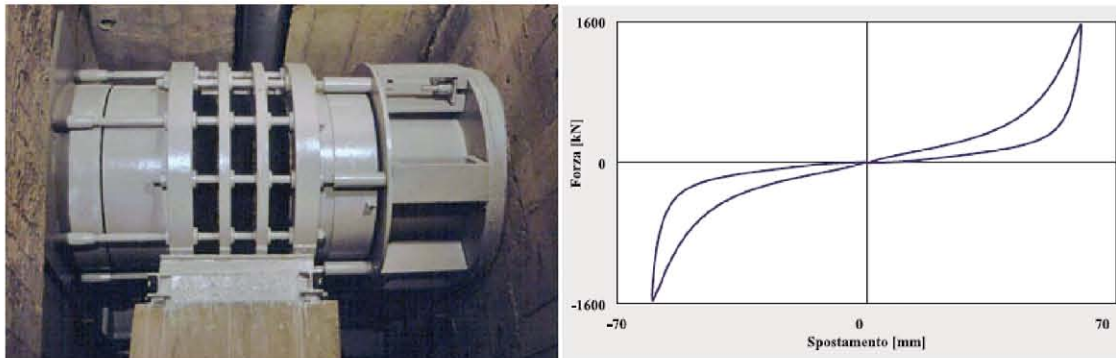
El disipador histerético de acero aprovecha la plasticidad de los elementos de acero de forma oportuna, diseñado para garantizar un comportamiento cíclico estable. El elemento en forma de media luna es muy usado en puentes, mientras que el disipador histerético axial es muy usado como arriostramiento disipativo en edificios. En puentes, el disipador histerético de acero se puede combinar con dispositivos de vínculo dinámico shock transmitters (STU).



En las imágenes, un disipador histerético de acero en forma de media luna durante una prueba y su diagrama fuerza-desplazamiento experimental.

- **DISPOSITIVO ELÁSTICO**

El dispositivo elástico (amortiguadores) es un dispositivo axial de doble efecto constituido de una serie de discos de elastómero interpuestos entre placas de acero. Una serie de barras une las placas a los extremos de anclaje y hace difícil el trabajo a compresión cualquiera que sea la dirección del movimiento. El dispositivo elástico se utiliza únicamente en puentes en los estribos y/o entre tableros de puentes adyacentes, en articulaciones.

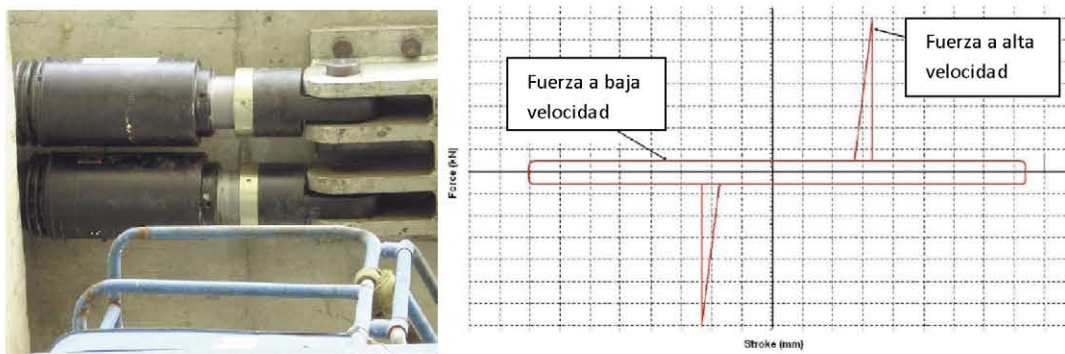


En las imágenes, un dispositivo elástico situado en un puente, y su diagrama fuerza-desplazamiento experimental.

- **SHOCK TRANSMITTERS UNITS (STU)**

El dispositivo de vínculo dinámico, también conocido en inglés como shock transmitters, forma una conexión rígida frente a una acción dinámica (sismo o frenado), a la vez que permite el movimiento lento de la estructura, tales como los producidos por los cambios de temperatura, sin ofrecer una resistencia apreciable.

Se utiliza en los casos en los que es conveniente un comportamiento estructural distinto para las acciones de servicio que para las sísmicas o dinámicas. Se suele colocar entre las distintas partes estructurales del puente como juntas de dilatación, y en apoyos entre la infraestructura y la superestructura.



En las imágenes, dos Shock Transmitters, y un diagrama fuerza-desplazamiento, con las diferencias entre un movimiento a alta y baja velocidad.

- **GUÍA Y RETENCIÓN**

Las guías son dispositivos mecánicos que permiten el libre desplazamiento en una sola dirección del plano, transfiriendo la carga horizontal en las demás direcciones.

Las retenciones son dispositivos mecánicos fijos, que bloquean el desplazamiento en una única dirección, consintiendo en las demás direcciones.

También hay una retención que bloquea el desplazamiento en todas las direcciones y permiten la rotación.

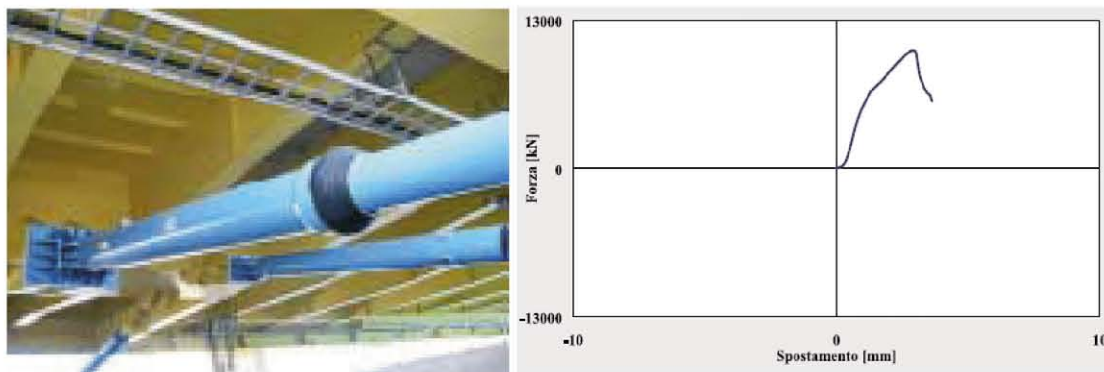


En las imágenes, a la derecha un dispositivo de guía y a la izquierda un dispositivo de retención.

- **DISPOSITIVO DE FUSIBLE MECÁNICO**

El dispositivo de limitación de fusible mecánico evita el movimiento relativo entre las partes conectadas hasta que alcanza un umbral de fuerza. Al superar esta fuerza, gracias a un elemento de sacrificio, permite tales movimientos.

Se utiliza para limitar el sistema de protección sísmica en las condiciones de servicio, pero permite su libre funcionamiento durante el sismo de diseño.



En las imágenes un dispositivo de fusible mecánico instalado en un puente y el diagrama fuerza-desplazamiento de un dispositivo de este tipo.

3. ESTUDIO DE LOS DISTINTOS DISPOSITIVOS

En el apartado anterior realizamos una breve descripción de los distintos dispositivos que podemos encontrar en puentes, pero nos centramos en tres dispositivos que representan muy bien tres tipos de comportamiento:

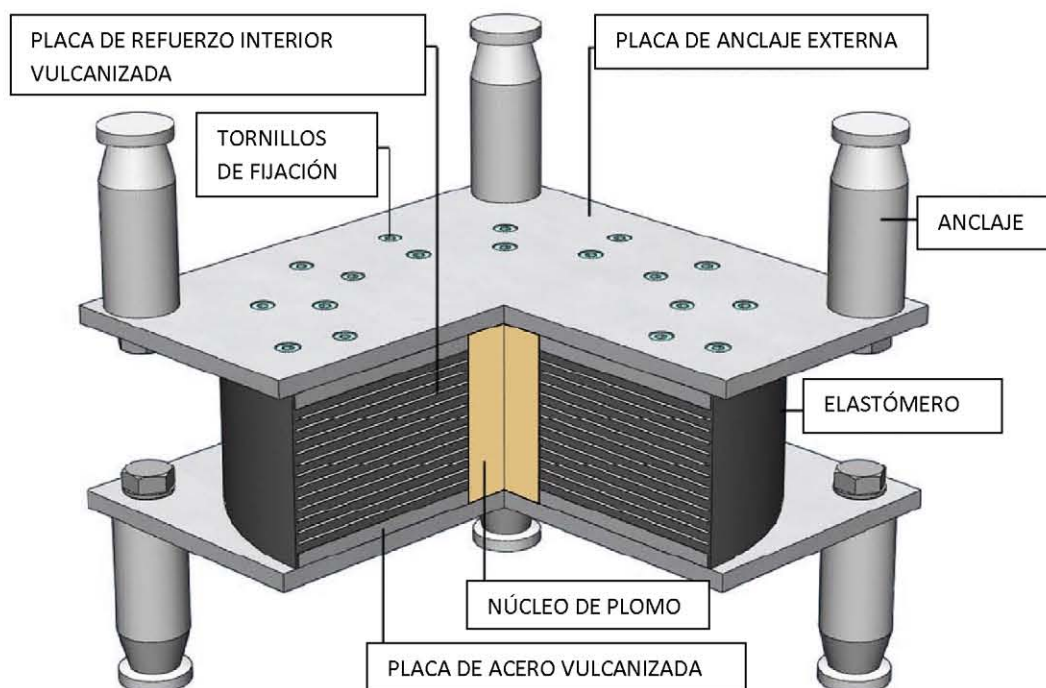
- Dispositivo elastoplástico: Apoyo elastomérico con núcleo de plomo.
- Dispositivo pendular: Apoyo deslizante en superficie curva.
- Dispositivo viscoso: Amortiguador viscoso.

a. Apoyo elastomérico con núcleo de plomo

DESCRIPCIÓN GENERAL

Los apoyos elastoméricos con núcleo de plomo, también conocido como Lead Rubber Bearings (LRB), son dispositivos de apoyo en elastómero armado. Se componen de capas alternas de acero y de elastómero conectados mediante vulcanización, con un núcleo central de plomo de forma cilíndrica. El plomo (utilizando plomo de pureza al 99,9%) tiene la propiedad de deformarse plásticamente disipando energía y recrystalizando después de un ciclo de deformación plástica. Al hacerlo, puede soportar un número indefinido de ciclos de histéresis.

Por lo general suele ser de planta circular, pero pueden ser realizados con sección cuadrada, eventualmente con más de un núcleo de plomo.





En la imagen, un dispositivo elastomérico con núcleo de plomo (LRB) de FIP-Industriale.

MATERIALES

Aparte del plomo del núcleo central de pureza superior al 99,9% encontramos distintos tipos de compuestos de goma para adaptarse mejor a las exigencias de proyecto. Prácticamente todos los fabricantes distinguen tres tipos de compuestos, que los dividen en compuesto blando, normal y duro.

Como nos centramos en la industria europea, podemos observar diferencias entre las características de la goma fabricada por Alga, Fip y Maurer:

En ALGA podemos diferenciar dos compuestos:

- Un compuesto blando (Soft) con módulo de elasticidad tangencial $G = 0,4 \text{ MPa}$ y amortiguamiento viscoso equivalente del 10%.
- Un compuesto normal (Normal) con módulo de elasticidad tangencial $G = 0,9 \text{ MPa}$ y amortiguamiento viscoso equivalente del 4%.

En FIP las gomas utilizadas son caracterizadas de un módulo de elasticidad tangencial $G = 0,4 \text{ MPa}$ (compuesto S) o $G = 0,6 \text{ MPa}$ (compuesto SN). A petición se pueden fabricar con valores superiores del módulo G , de hasta $1,4 \text{ MPa}$.

El fabricante MAURER utiliza elastómeros con módulos de elasticidad tangencial $G = 0,8-1,2 \text{ MPa}$.

PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

Como apoyo, el dispositivo realiza la función de transmitir las cargas verticales. Actúa como un apoyo convencional, es decir, transfiere las cargas verticales en la ubicación prevista de la superestructura hacia la infraestructura.

Para mitigar la energía procedente del evento sísmico, el apoyo elastomérico con núcleo de plomo aplica dos efectos combinados:

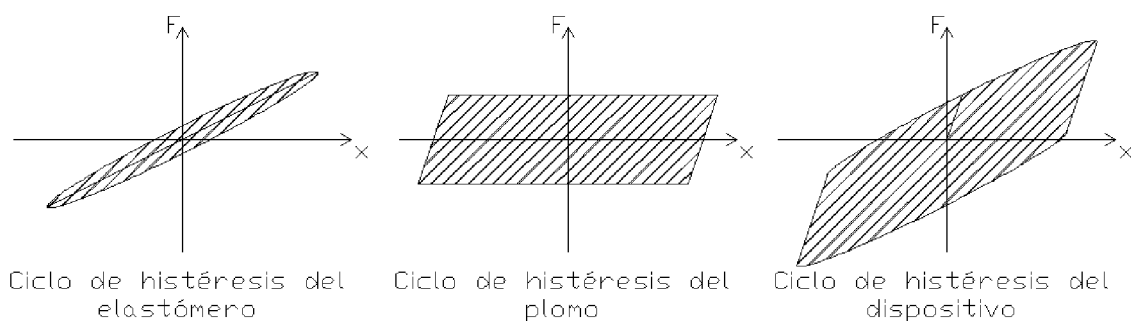
- Aumenta la flexibilidad mediante la inclusión del apoyo entre la infraestructura y la superestructura. Se aumenta notablemente el periodo propio, reduciendo la aceleración espectral y por lo tanto las fuerzas sísmicas.
- Disipa energía (en forma de calor). El apoyo permite una reducción del espectro de respuesta que se traduce en una reducción adicional de las fuerzas sísmicas.

La disipación de energía es proporcionada por el núcleo de plomo, mediante su plastificación. Permite obtener un coeficiente de amortiguamiento viscoso equivalente de hasta cerca de un 30%, es decir, el doble que el obtenido con los apoyos elastoméricos de alto amortiguamiento.

Gracias a la elevada capacidad disipativa, puede reducir el desplazamiento horizontal, en comparación con la de un sistema de apoyo con idéntica rigidez equivalente pero con menos capacidad de disipación.

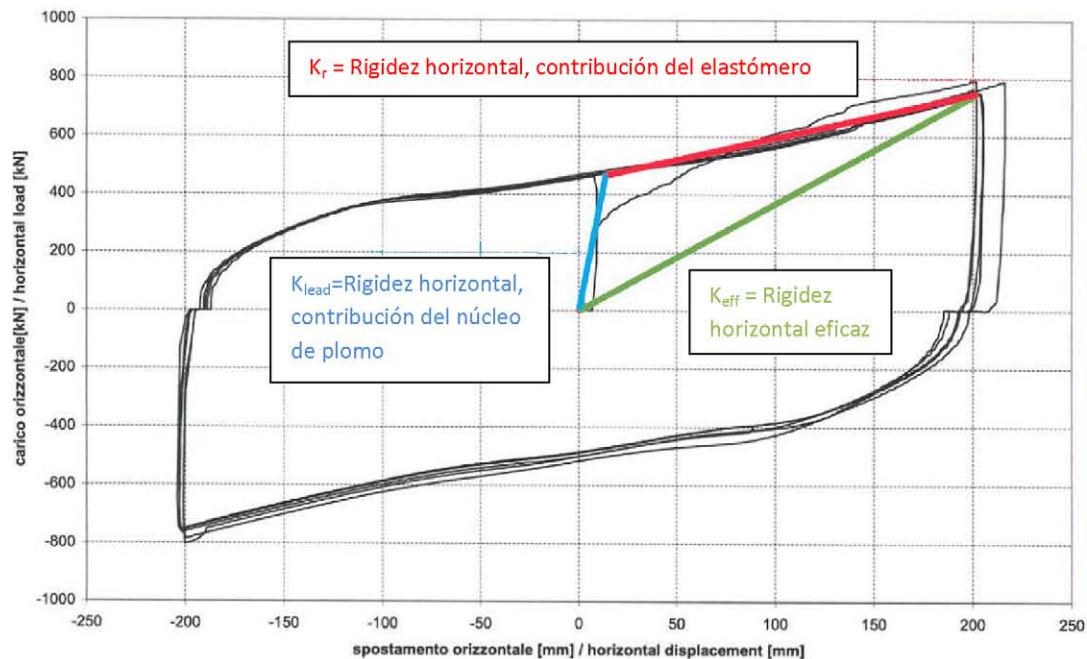
El sistema de protección sísmica con elastómeros con núcleo de plomo asegura la capacidad completa de servicio después del terremoto y se evitan completamente los daños estructurales. De ahí que la estructura está lista para entrar en servicio de nuevo y posiblemente después de más terremotos. Además no son necesarias obras de renovación de los dispositivos o estructuras, lo que demuestra que este sistema de protección sísmica es también el concepto más económico a elegir.

Los ciclos de histéresis de cada uno de los materiales trabajando de manera aislada nos dan una idea de su forma de trabajo conjunta.



La energía disipada se calcula por el área encerrada por la curva cíclica. Observamos que el elastómero disipa algo de energía, pero la mayor contribución es la realizada por el plomo. A mayor área de plomo con respecto a la goma, mayor es la energía disipada.

Su comportamiento puede ser definido de la siguiente manera:

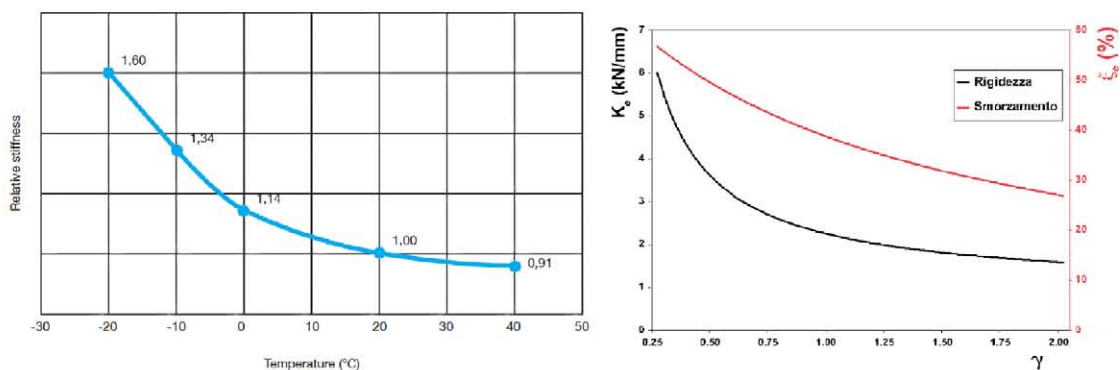


El siguiente gráfico representa el diagrama fuerza-desplazamiento en el que observamos el ciclo histerético de un dispositivo (ALGA)

Observamos la rigidez eficaz, cuyo resultado es el utilizado para realizar un análisis lineal del problema, como veremos más adelante.

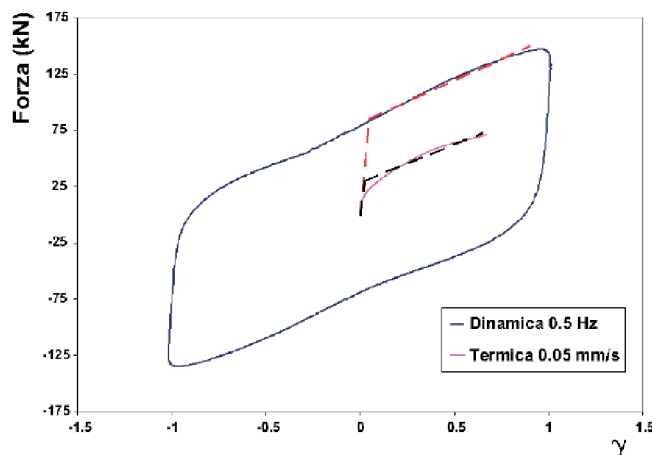
El núcleo de plomo cumple con la función de dar mayor rigidez para las deformaciones pequeñas.

La rigidez equivalente y el amortiguamiento equivalente varían en función de la deformación tangencial, disminuyen al aumentar esta. La rigidez también aumenta con la disminución de la temperatura. Observamos estos comportamientos en los siguientes gráficos:



A la izquierda un gráfico rigidez-temperatura por ALGA, a la derecha la rigidez y el amortiguamiento en función de la deformación tangencial por FIP-Industriale

El apoyo elastomérico con núcleo de plomo se comporta de distinta manera dependiendo de si se trata de un movimiento dinámico o cuasi-estático.



En la imagen, la comparación entre un comportamiento dinámico y un comportamiento cuasi-estático (térmico), por FIP-Industriale.

Las cuñas de acero interior no sólo otorgan una buena capacidad de carga, sino también un confinamiento adecuado para el núcleo de plomo.

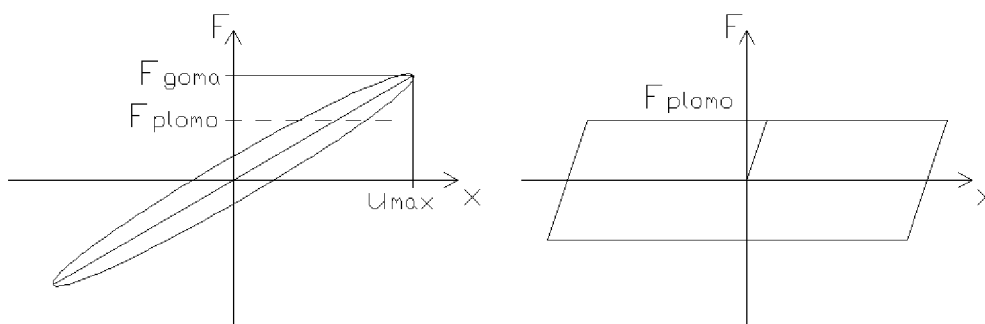
RECENTRADO

El propósito de la capacidad de auto-centrado es devolver a la estructura a la posición neutral media. No es tanto limitar los desplazamientos residuales al final del sismo, sino más bien evitar desplazamientos acumulados durante el evento sísmico.

El autocentrado adquiere una especial importancia en las estructuras situadas en las proximidades de una falla, donde los terremotos se caracterizan por acelerogramas altamente asimétricos (Near Field o Fling effect). El efecto del recentrado se basa en la elasticidad natural aplicada por la goma.

Cabe señalar que la disipación de la energía y la capacidad de recentrado (a veces referido como la restauración de la fuerza) son dos funciones opuestas y su importancia relativa depende primeramente del caso en examen.

Si suponemos el caso hipotético en el que la acción sísmica cesa en el momento en que el dispositivo se encuentra completamente desplazado, la fuerza elástica aplicada por la goma debe de ser mayor que la fuerza de plastificación del plomo, para que se produzca algún tipo de desplazamiento de recentrado. El plomo al recrystalizar se comporta como si no hubiera ocurrido ningún tipo de desplazamiento.



MONTAJE

El procedimiento típico de instalación del apoyo vinculado superior e inferiormente a la estructura de hormigón armado in situ, tiene las siguientes fases:

- Proyecto de la subestructura hasta un nivel más bajo de algún centímetro de los apoyos, proporcionando agujeros de alojamiento de los pernos de anclaje de diámetro al menos doble de los mismos.
- Posicionamiento de los apoyos a la altura correcta con la ayuda de cuñas o tornillos de fijación y el encofrado del área circundante al apoyo.
- Realización del acoplamiento en mortero sin retracción o mortero epoxídico. El mortero no debe estar armado si su espesor es menor o igual a los siguientes valores:

50 mm ó

$$0,1 \cdot \frac{\text{area placa metálica}}{\text{perímetro placa metálica}} + 15\text{mm}$$

- Apriete del soporte superior (si no está fijo).
- Encofrado de la superestructura y sellado alrededor del apoyo.
- Realización de la superestructura.

El esquema típico de colocación de los apoyos elastoméricos con núcleo de plomo es el siguiente:



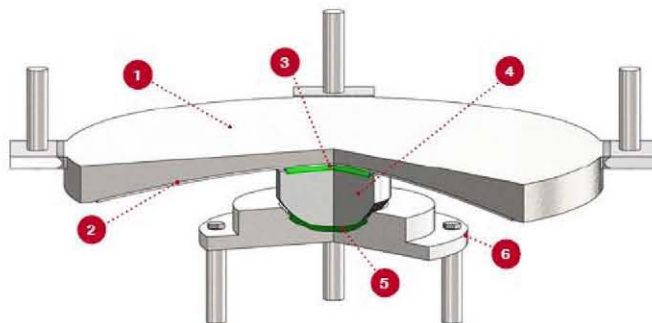
b. Dispositivo pendular

DESCRIPCIÓN GENERAL

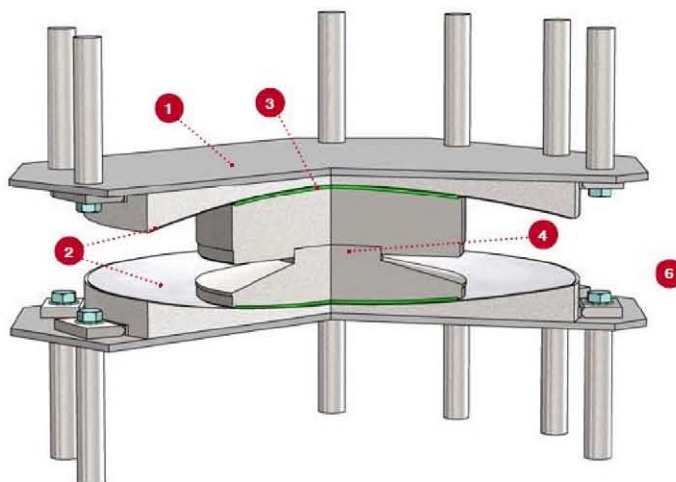
Los apoyos deslizantes de superficie curva (dispositivos pendulares) son dispositivos de apoyo en acero caracterizado de una ley de funcionamiento atribuible a la operación del péndulo simple, en el cual el periodo de oscilación no depende de la masa soportada por el apoyo sino de la longitud del mismo péndulo (el radio de curvatura).

Los dispositivos están esencialmente constituidos de 3 elementos de acero superpuestos: una base cóncava superior, de forma apropiada con el fin de obtener el periodo de oscilación deseado; una rótula central, convexa superior e inferior; por último un tercer elemento que se acopla a continuación de la rótula, consintiendo la rotación. Al fin de controlar la fricción opuesta al movimiento de la superficie de deslizamiento y rotación, se usa el oportuno material termoplástico. Si resulta necesario reducir el tamaño en planta o si tenemos una particular necesidad constructiva, conviene utilizar los apoyos deslizantes de doble superficie curva, que tiene dos superficies de deslizamiento cóncavo de igual radio de tal manera que permitirá el deslizamiento en ambas superficies.

La superficie deslizante se coloca boca abajo para evitar la contaminación de la interfase de deslizamiento.



En las imágenes, esquemas del fabricante Alga. El esquema superior representa un apoyo con una superficie esférica principal de deslizamiento y la imagen inferior representa un apoyo con dos superficies esféricas principales de deslizamiento.



En cada uno de ellos encontramos las siguientes partes:

1. Placa superior de anclaje.
2. Superficie de deslizamiento principal.
3. Material de deslizamiento.
4. Articulación de rotación.
5. Superficie de deslizamiento secundaria de rotación.
6. Placa inferior de anclaje.



En la imagen, un dispositivo pendular de doble superficie esférica de deslizamiento en un momento del ensayo.

MATERIALES

Lo más importante en estos dispositivos es el material utilizado como superficie de deslizamiento. Se usa el oportuno material termoplástico, tipo TEFLÓN, con coeficientes de rozamiento muy bajos.

Estos materiales presentan una excepcional resistencia al desgaste y a las altas temperaturas y buena resistencia a compresión. Estas características los hacen especialmente adecuados como elementos disipadores de energía basados en la fricción con resultados excepcionales.

Algunas empresas tienen patente sobre los materiales usados como superficie de deslizamiento, mejorando alguna de las características de los materiales empleados habitualmente.

El coeficiente de rozamiento de estos materiales están en el entorno de 0,03 – 0,05.

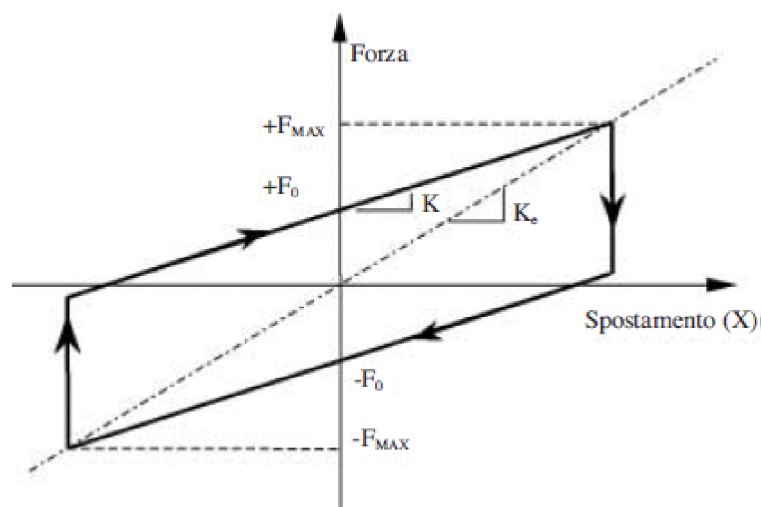
PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

Los dispositivos pendulares se caracterizan por las siguientes propiedades únicas:

- Permiten el desplazamiento relativo de la estructura respecto a la base de acuerdo a una o dos superficies esféricas.
- El radio de curvatura de la o las superficies esféricas determina el periodo propio de vibración de la estructura.
- El periodo propio es independiente de la masa de la estructura, por lo tanto no dan lugar a efectos torsionales en torno al eje vertical durante el terremoto porque garantizan la coincidencia del centro de masas y del centro de rigidez.

- La fricción de la superficie de deslizamiento determina el amortiguamiento viscoso equivalente. A mayor fricción, mayor área del ciclo de histéresis y por tanto mayor amortiguamiento.
- Se auto-centran después de un evento sísmico.

El modelo matemático que mejor representa el funcionamiento de los dispositivos pendulares es la curva bilineal Fuerza-Desplazamiento, cuya intersección con el eje vertical representa la fuerza de fricción $F_0 = \mu \cdot N$ desarrollada por el apoyo (μ representa el coeficiente de fricción y N la carga vertical). Una vez que se sobrepasa esta fuerza, se inicia el deslizamiento. La rigidez $K = N/R$ depende, sin embargo, de la carga vertical y del radio geométrico de curvatura R . Este comportamiento se estudia más detenidamente en el apartado 4.b.



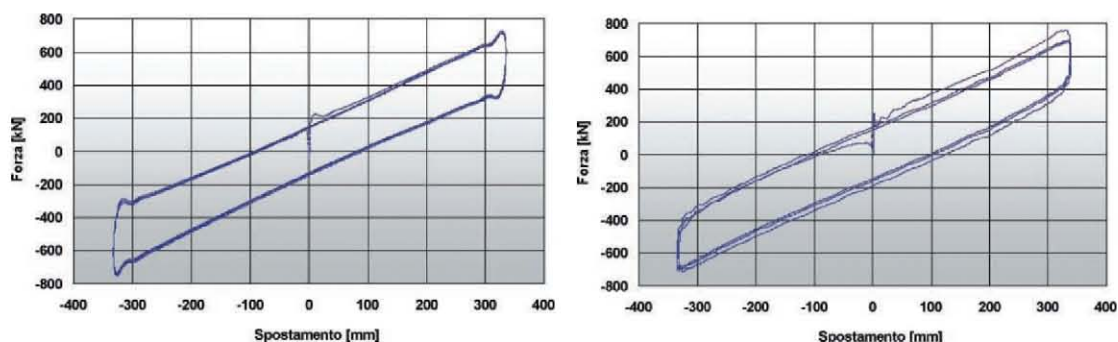
Como observamos, este comportamiento introduce unas mejoras en el comportamiento sísmico de la estructura:

- Aumenta la flexibilidad mediante la inclusión de los dispositivos pendulares entre la infraestructura y la superestructura, se aumenta notablemente el periodo propio, reduciendo la aceleración espectral y por lo tanto las fuerzas sísmicas.
- Por lo general, estos apoyos proporcionan un coeficiente de amortiguamiento viscoso equivalente ξ_e entre el 15 y el 30 %, en función del coeficiente de fricción del material utilizado, del radio de curvatura y del desplazamiento de proyecto. Disipando energía (en forma de calor), el apoyo permite una reducción del espectro de respuesta que se traduce en una reducción adicional de las fuerzas sísmicas.

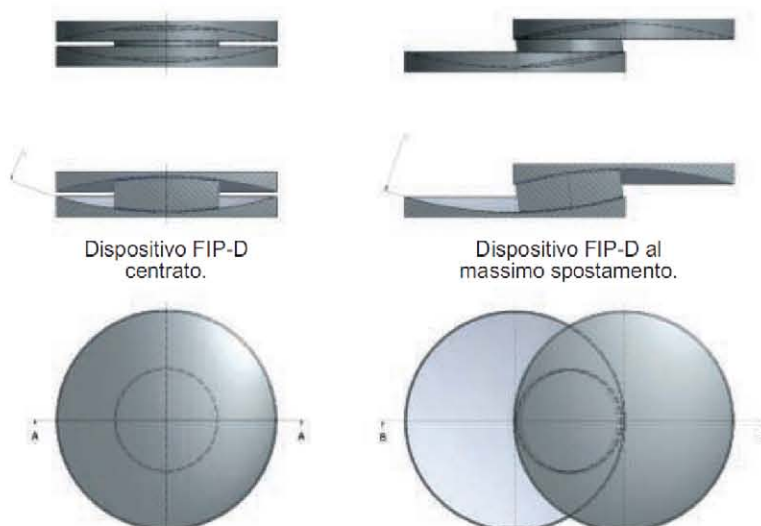
Esto nos lleva a unas mejoras básicas, toda la estructura se conserva mejor debido a los menores esfuerzos que debe soportar, evitando los daños graves que pueden conducir al colapso. La reducción de la acción sísmica en la estructura tiene la ventaja

inmediata de la reducción del coste de esta. Cuanto mayor es la sismicidad de la zona mayor será el ahorro con respecto a la estructura no aislada.

En los siguientes gráficos observamos un dispositivo ensayado a velocidad constante y a velocidad variable. Observamos cómo la variación de velocidad no influye en los resultados obtenidos.



Ensayos de dispositivos pendulares de FIP-Industriale. A la izquierda un ensayo a velocidad constante y a la derecha un ensayo a velocidad variable.



Dispositivo FIP-D centrado.

Dispositivo FIP-D al massimo spostamento.

En el esquema anterior, observamos cómo ocurre el movimiento en un dispositivo de doble superficie curva por FIP-Industriale.

RECENTRADO

Una de las principales características del dispositivo pendular es la capacidad de recentrado. Su fin es mantener la estructura en posición horizontal, o “posición cero”, lo que significa que debido a una fuerza horizontal y su consecuente desplazamiento se puede crear un efecto de recentrado. No es tanto limitar los desplazamientos residuales al final del sismo, sino más bien evitar desplazamientos acumulados durante el evento sísmico.

Analizando la ecuación de las fuerzas ocurridas en el dispositivo (apartado 4.b.), observamos que durante la elevación a lo largo de la superficie esférica, el apoyo

desarrolla una fuerza resistente lateral igual a la combinación de la fuerza friccional movilizada y una fuerza de restauración inducida por la gravedad. Esa fuerza de restauración es la que nos produce el recentrado.

$$F_{max} = N_{sd} \cdot \frac{d_{bd}}{R_b} + N_{sd} \cdot \mu_d$$

Si suponemos el caso hipotético en el que la acción sísmica cesa en el momento en que el dispositivo se encuentra completamente desplazado, para que se produzca el recentrado de la estructura la fuerza de restauración debe de ser mayor que la fuerza de rozamiento, para lo que se debe cumplir que:

$$N_{sd} \cdot \frac{d_{bd}}{R_b} > N_{sd} \cdot \mu_d \rightarrow \frac{d_{bd}}{R_b} > \mu_d$$

MONTAJE

El procedimiento típico de instalación del apoyo vinculado superior e inferiormente a la estructura de hormigón armado in situ, tal como vimos para el dispositivo elastomérico con núcleo de plomo, tiene las siguientes fases:

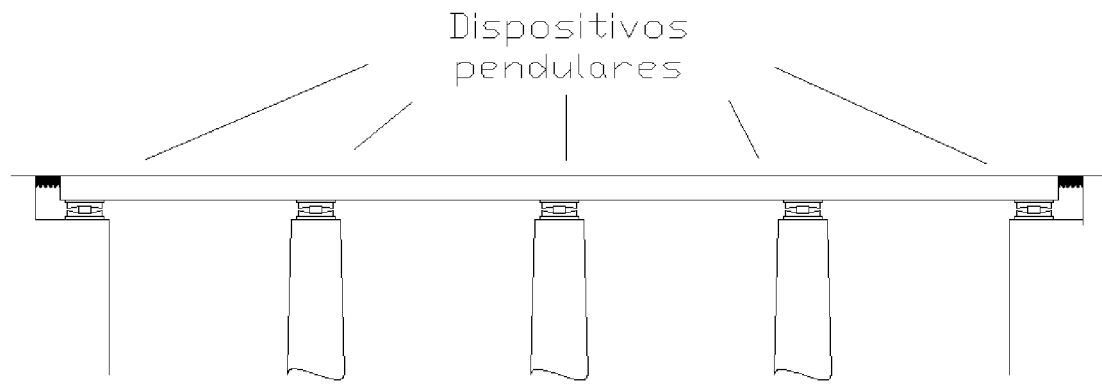
- Proyecto de la subestructura hasta un nivel más bajo de algún centímetro de los apoyos, proporcionando agujeros de alojamiento de los pernos de anclaje de diámetro al menos doble de los mismos.
- Posicionamiento de los apoyos a la altura correcta con la ayuda de cuñas o tornillos de fijación y el encofrado del área circundante al apoyo.
- Realización del acoplamiento en mortero sin retracción o mortero epoxídico. El mortero no debe estar armado si su espesor es menor o igual a los siguientes valores:

50 mm ó

$$0,1 \cdot \frac{\text{area placa metálica}}{\text{perímetro placa metálica}} + 15mm$$

- Apriete del soporte superior (si no está fijo).
- Encofrado de la superestructura y sellado alrededor del apoyo.
- Realización de la superestructura.

Esquema típico de colocación de los apoyos elastoméricos con núcleo de plomo es el siguiente:



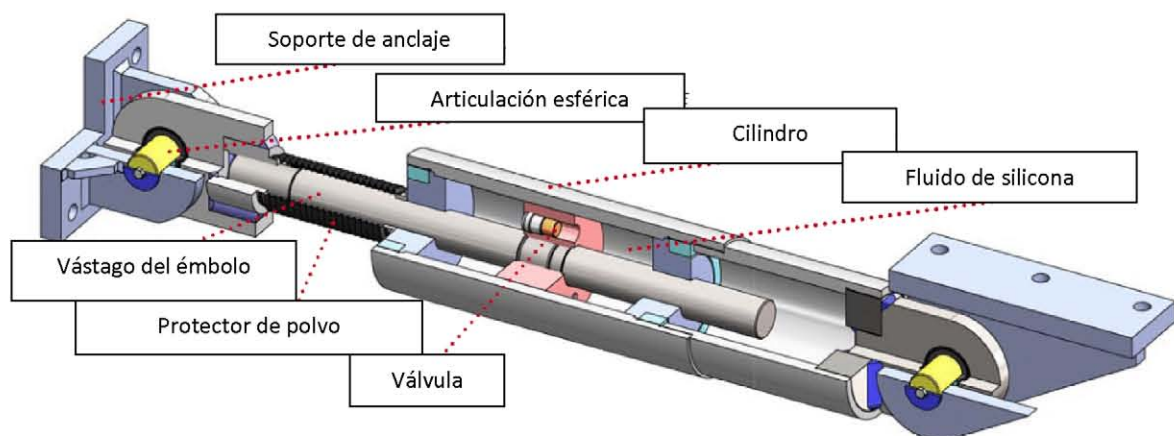
c. Amortiguador viscoso

DESCRIPCIÓN GENERAL

Además de los apoyos de puentes (apoyos elastoméricos o apoyos deslizantes), a menudo es necesario utilizar amortiguadores viscosos para la disipación eficaz de energía. Garantiza la máxima amortiguación posible por la disipación de energía en las distintas partes de la estructura.

Los amortiguadores de tipo viscoso están básicamente compuestos de un cilindro lleno de fluido de silicona (aceite o pasta) y un pistón que se divide en dos cámaras y es libre de moverse en ambas direcciones. El amortiguador trabaja según el principio de que el paso rápido de un fluido viscoso a través de un orificio estrecho genera una alta resistencia y por tanto disipa una gran cantidad de energía como calor. Según las exigencias de proyecto y de la ley constitutiva, el circuito hidráulico viene diseñado y dimensionado de modo que disipe la cantidad de energía requerida.

El efecto de amortiguamiento por unidad de volumen del dispositivo es limitado y por ello, estos amortiguadores deben ser grandes para compensar.



En la imagen, un amortiguador viscoso del fabricante Taylor

MATERIALES

Se usa un fluido de silicona especial, que junto con la adopción de un circuito hidráulico (válvula) nos permite obtener los parámetros C y α deseados.

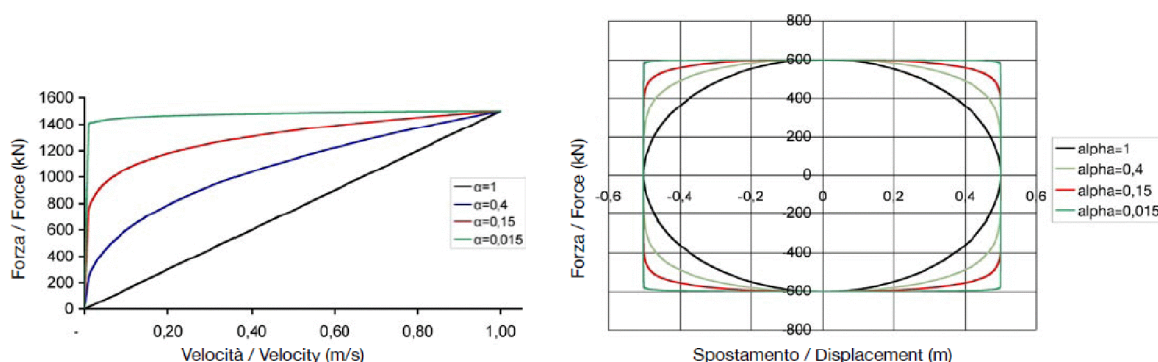
Para maximizar la disipación de energía es muy importante que la compresibilidad del fluido sea la más baja posible, en caso contrario el dispositivo almacenará una parte de la energía en forma de energía elástica para restituirla cíclicamente en vez de disiparla.

Las funciones de los mecanismos de amortiguamiento viscoso están también afectadas por factores como la temperatura y la velocidad de vibración.

Durante el diseño de los amortiguadores se debe investigar la capacidad de deformación y amortiguamiento de éstos, bajo condiciones de temperatura locales. Debido a que la temperatura de los materiales viscosos se eleva bajo repetidos ciclos de carga, los efectos de amortiguamiento descienden. Es por ello que puede ser necesaria la utilización de placas de acero con gran capacidad térmica u otras medidas de resistencia al calor en el dispositivo. Todas las empresas fabricantes ofrecen un comportamiento estable y un rendimiento constante en un amplio rango de temperaturas (rangos mayores de $-25/+50^{\circ}\text{C}$).

PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

El comportamiento de este tipo de dispositivos viene determinado por la ley constitutiva fuerza-velocidad $F = C \cdot v^{\alpha}$, donde F es la fuerza, C es la constante de amortiguamiento, v es la velocidad y α es un exponente que describe la propiedad disipativa del amortiguador. Para analizar el comportamiento debemos analizar los distintos parámetros (ver apartado 4.c.).



En la imagen, gráficos teóricos de Alga, a la izquierda, diagrama de respuesta fuerza-velocidad, a la derecha, el diagrama fuerza-desplazamiento, ambos en función de α

Como vemos, para valores de α muy pequeños, cercanos a 0, estos dispositivos reaccionan con una fuerza casi constante en una amplia gama de velocidades, a las cuales se somete la estructura durante eventos sísmicos, cargas de tráfico o similares.

Si se presenta un movimiento repentino, se disipa la máxima cantidad de energía, es decir, la energía de movimiento se transforma en calor dentro del amortiguador. Sin embargo, los amortiguadores viscosos son componentes que permiten movimientos (debido a los cambios de temperatura, dilatación, contracción, etc.) en condiciones de reposo de la estructura, sin producir importantes fuerzas de respuesta.

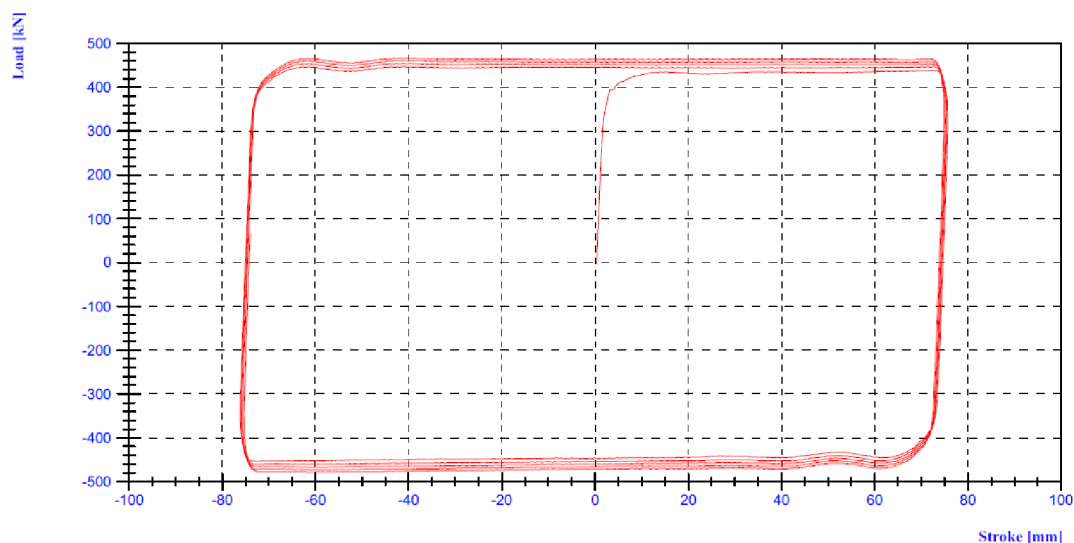
Movimientos muy lentos producidos por las diferencias de temperatura o similares no dan lugar a fuerzas significativas de respuesta en el amortiguador. El fluido se puede mover de un lado a otro del pistón.

Por un lado, el proyectista puede estar seguro de que se disipa una cantidad máxima de la entrada de energía, la fuerza de respuesta máxima del amortiguador es conocida con exactitud, independientemente de las cargas sísmicas o de cargas similares.

Las características fundamentales son:

- No trabaja ninguna fuerza de respuesta (máximo 10% de la fuerza de diseño) resultante de los movimientos debidos a contracción/dilatación y cambios de temperatura.
- El bloqueo brusco forma una fuerza de resistencia (fuerza de diseño) para los movimientos que surgen repentinamente debido al tráfico, terremoto o similar.
- Limitación de la fuerza máxima de respuesta (fuerza límite) en caso de que entre mucha energía, que causaría una fuerza de respuesta indefinida.

Algunos fabricantes permiten obtener una gran variedad de valores del exponente α , aunque normalmente para la disipación de energía nos interesarán los valores más bajos, no superiores a 0,4.



En la imagen, un diagrama histerético fuerza-desplazamiento de un dispositivo por FIP-Industriale.

RECENTRADO

Los dispositivos viscosos no tienen capacidad de recentrado por sí mismos. Cuando cesa el evento sísmico se quedan desplazados en mayor o menor grado.

La capacidad de recentrado depende en gran medida de los aparatos de apoyo utilizados, apoyos elastoméricos o apoyos deslizantes. En el caso de apoyos deslizantes se usa una pila como apoyo fijo que evitará que la estructura quede desplazada de manera importante (normalmente la pila central).

Suele ser necesario, después de un evento sísmico importante, devolver a la estructura a su punto inicial mediante gatos, sobretodo en zonas situadas en las proximidades de una falla, donde los terremotos se caracterizan por acelerogramas altamente asimétricos.

Por seguridad, los elementos del sistema deberán dimensionarse para permitir unos desplazamientos incrementados en un 50% respecto a los desplazamientos totales en situación sísmica.

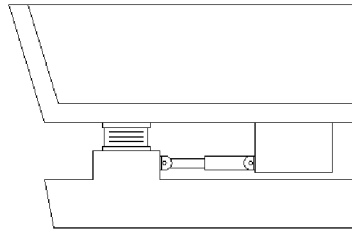
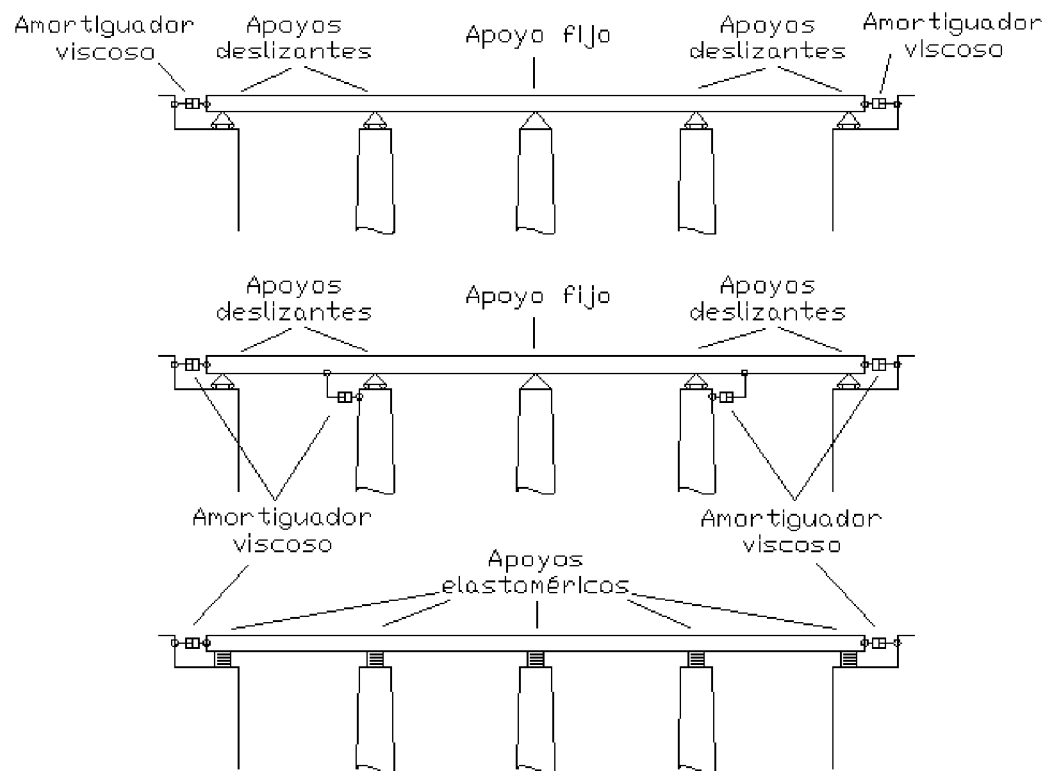
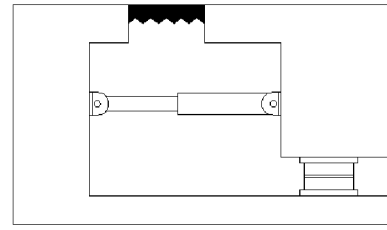
MONTAJE

Los dispositivos amortiguadores viscosos son utilizados eficazmente en los desplazamientos relativos que pueden ocurrir entre dos elementos estructurales bajo cargas dinámicas: por ejemplo, en puentes entre el tablero y los pilares o entre el tablero y estribos.

En primer lugar se realiza la estructura completa y por último se colocan los amortiguadores. Son fáciles de montar, y tienen la gran ventaja de que pueden ser instalados tanto en construcciones nuevas como en construcciones existentes.

Normalmente el amortiguador se suministra con los soportes de anclaje ya conectados al dispositivo. Se suelen proporcionar también las placas de montaje para la prefabricación de la estructura. La conexión a la estructura se realiza mediante bulones que, si es necesario, permiten una fácil sustitución.

Algunos esquemas típicos de colocación de los amortiguadores viscosos son los siguientes:

Protección
trasversal del
puenteProtección
longitudinal del
puente

4. CÁLCULO DE LOS DISPOSITIVOS

En el cálculo simplificado, cada uno de los dispositivos tiene asociado un amortiguamiento y rigidez equivalente. Aquí se define el proceso de cálculo a seguir para hallar estos parámetros.

Teniendo en cuenta que el comportamiento de los dispositivos es fuertemente no lineal, implica que tanto la rigidez eficaz (K_{eff}) como el amortiguamiento viscoso eficaz (ξ_{eff}) son válidos solo para el desplazamiento de proyecto dado (u_{max} , d_{bd}).

El amortiguamiento equivalente es el valor del amortiguamiento viscoso efectivo que corresponde a la energía disipada por el sistema de aislamiento durante la respuesta cíclica en el desplazamiento de diseño.

Para realizar el análisis lineal equivalente, el amortiguamiento efectivo en los sistemas de aislamiento no debe exceder el 30%. Este tipo de análisis lo podemos efectuar para el dispositivo elastomérico con núcleo de plomo y el pendular.

Para el dispositivo viscoso no podremos utilizar un análisis lineal. Aunque el amortiguamiento efectivo se calcula de la misma manera.

Si se utiliza un modelo lineal equivalente, la disipación de energía del sistema de aislamiento debe ser expresada en términos de un amortiguamiento viscoso equivalente, según la "amortiguación eficaz" (ξ_{eff}). La disipación de energía en los apoyos se debe calcular de la energía medida, disipada en ciclos con una frecuencia en el rango de las frecuencias naturales de los modos considerados.

Según lo dicho anteriormente, el amortiguamiento efectivo es igual a:

$$\xi_{eff} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{E_{D,i}}{E_T}$$

La energía total, dada su definición, tiene la siguiente relación:

$$E_T = F \cdot x = K \cdot x^2 = \omega^2 \cdot m \cdot x^2$$

Siendo:

x , es el desplazamiento producido en el dispositivo

F , es la fuerza en el dispositivo que produce el desplazamiento x

Donde $F = K \cdot x$, dada la ley de Hooke

K es la rigidez

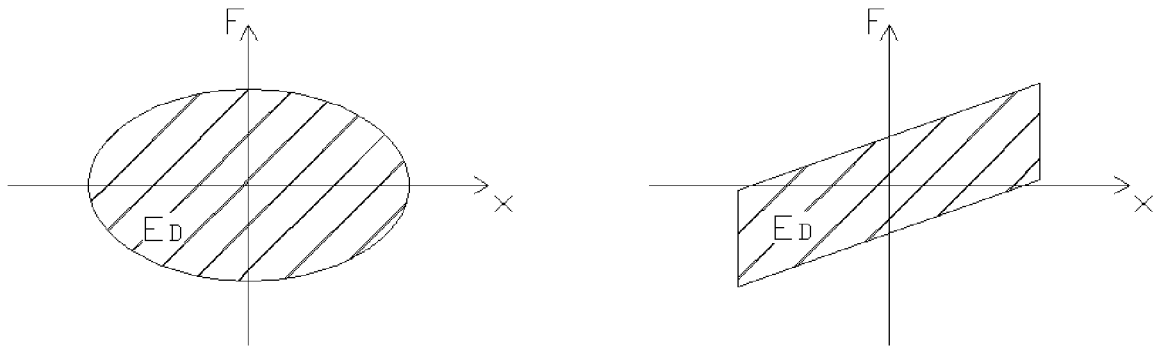
ω , es la frecuencia angular

m es la masa

Estos tres ultimos elementos se relacionan de la siguiente manera:

$\omega^2 = \frac{K}{m}$, la frecuencia angular es $\omega = \frac{2\pi}{T}$ siendo T el periodo de oscilación

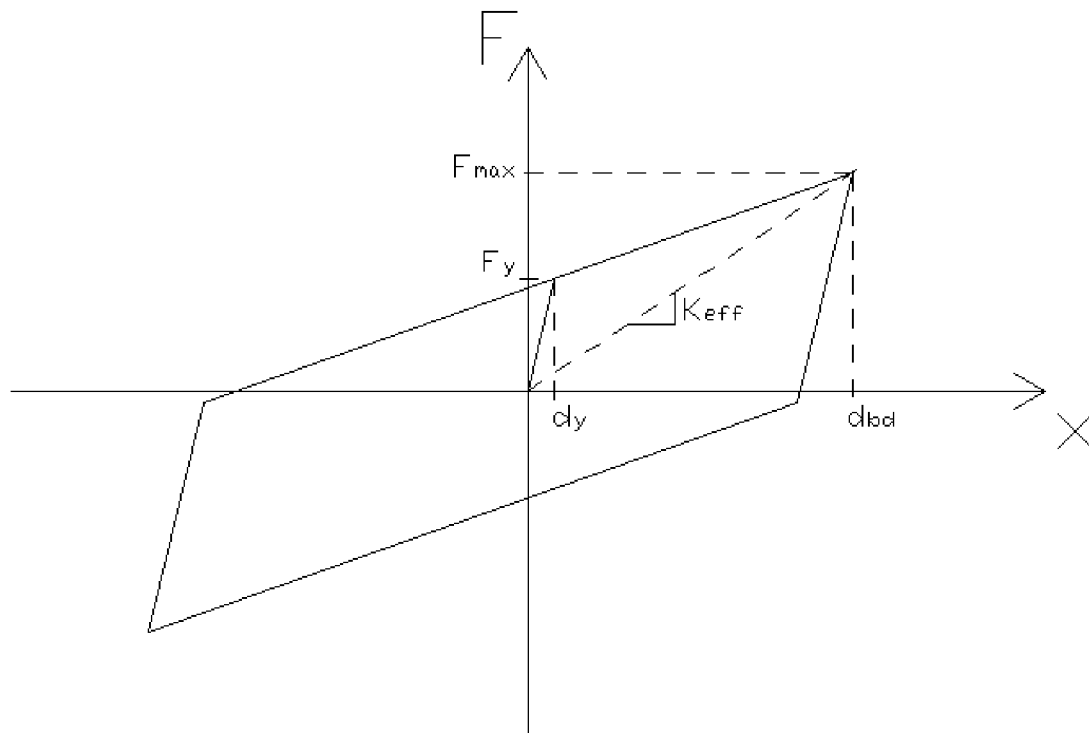
La energía disipada se calcula como el área encerrada por la curva cíclica fuerza-desplazamiento del dispositivo. Las curvas son de la siguiente forma:



Cada uno de los dispositivos antisísmicos tiene una curva característica, a continuación veremos cómo realizar el cálculo en cada uno de ellos.

a. Apoyo elastomérico con núcleo de plomo

El típico ciclo histerético fuerza-desplazamiento de un apoyo con núcleo de plomo puede ser esquematizado con una relación bilineal. Los parámetros d_y , F_y , d_{bd} y F_{max} definen la relación bilineal. El diagrama fuerza-desplazamiento tiene la siguiente forma:



Donde:

d_y el desplazamiento elastico

F_y es la máxima fuerza en regimen elástico del aislador

d_{bd} es el desplazamiento de diseño del aislador, es decir, el desplazamiento máximo

F_{max} es la fuerza máxima, correspondiente al desplazamiento de diseño

K_{eff} es la rigidez efectiva

Según el Eurocódigo 8, podemos modelar la estructura como lineal si el amortiguamiento viscoso es inferior al 30%, por lo que este tipo de dispositivos se calculará mediante una rigidez efectiva y el amortiguamiento viscoso equivalente.

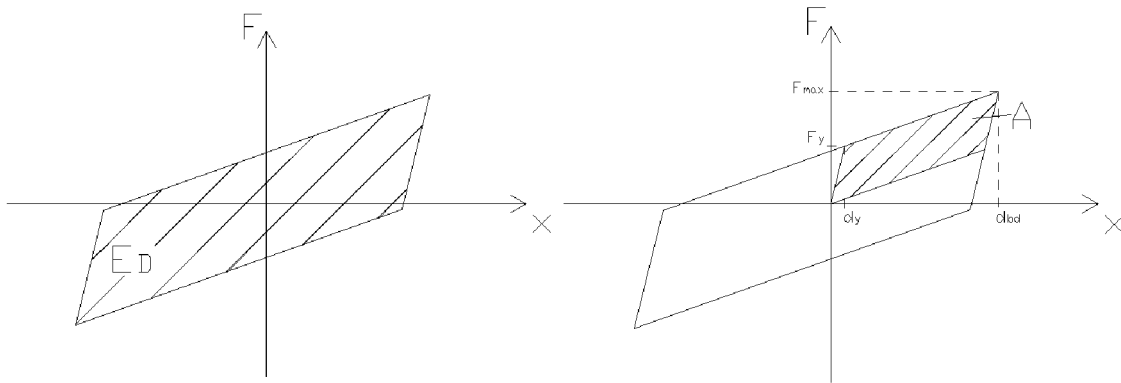
La rigidez efectiva para este dispositivo, representada en el diagrama superior, es:

$$K_{eff} = \frac{F_{max}}{d_{bd}}$$

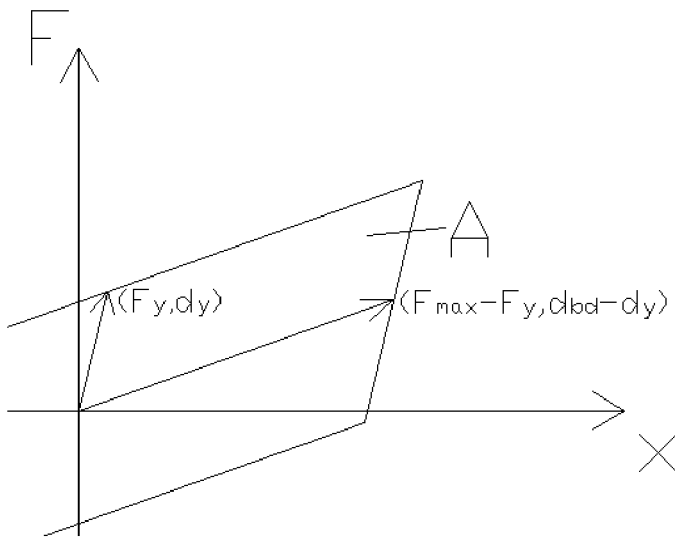
Tenemos que realizar el cálculo del amortiguamiento viscoso equivalente, que se calcula de la siguiente manera:

$$\xi_{eff} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{E_{D,i}}{E_T} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{E_{D,i}}{K_{eff} \cdot d_{bd}^2} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{E_{D,i}}{F_{max} \cdot d_{bd}}$$

Hallamos la energía disipada en un ciclo $E_{D,i}$ (imagen izquierda), calculado por el área A del paralelogramo representado en la imagen derecha.



Por lo que $E_{D,i} = 4 \cdot A$, siendo A un paralelogramo que calculamos mediante el siguiente producto vectorial de sus lados:



$$A = |\vec{u} \times \vec{v}| = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ F_y & d_y & 0 \\ F_{max} - F_y & d_{bd} - d_y & 0 \end{vmatrix} = |F_y(d_{bd} - d_y)\vec{k} - d_y(F_{max} - F_y)\vec{k}|$$

$$A = F_y(d_{bd} - d_y) - d_y(F_{max} - F_y) = F_y d_{bd} - F_{max} d_y$$

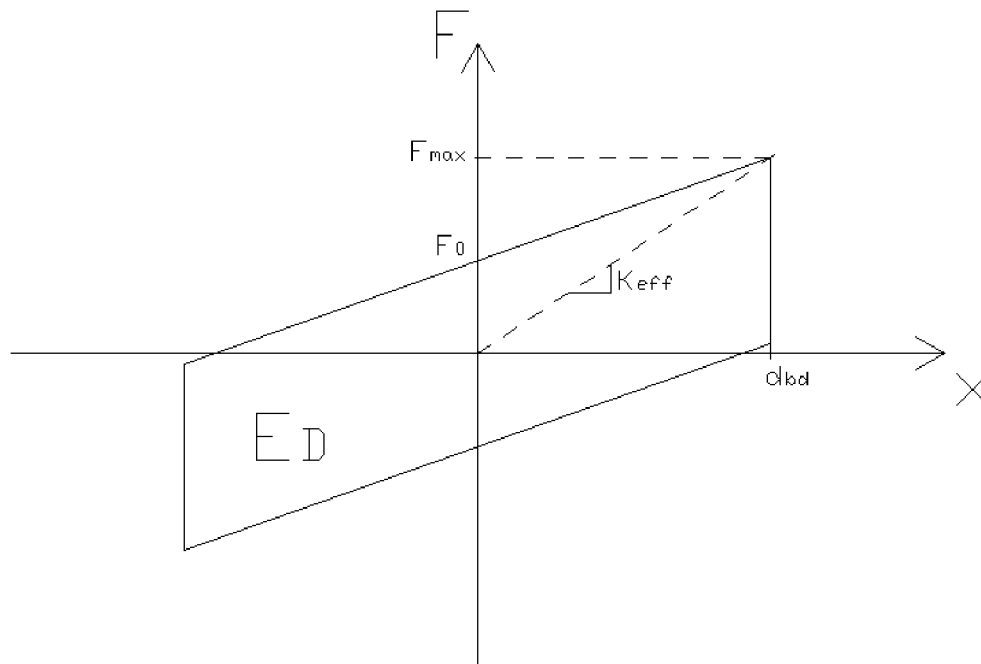
La energía disipada y el amortiguamiento viscoso equivalente queda de la siguiente manera:

$$E_{D,i} = 4(F_y d_{bd} - F_{max} d_y)$$

$$\xi_{eff} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{4(F_y d_{bd} - F_{max} d_y)}{F_{max} \cdot d_{bd}} = \frac{2}{\pi} \left(\frac{F_y}{F_{max}} - \frac{d_y}{d_{bd}} \right)$$

b. Dispositivo pendular

Por lo general, estos apoyos proporcionan un coeficiente de amortiguamiento viscoso equivalente ξ_e entre el 15 y el 30 %, en función del coeficiente de fricción del material utilizado, del radio de curvatura y del desplazamiento de proyecto. Podremos realizar el modelado de la estructura como lineal, hallando su rigidez efectiva y el amortiguamiento viscoso equivalente. Lo haremos en función de los parámetros anteriores. El diagrama fuerza-desplazamiento tiene la siguiente forma:



Donde:

d_{bd} es el desplazamiento de diseño del aislador, es decir, el desplazamiento máximo

F_{max} es la fuerza máxima, correspondiente al desplazamiento de diseño

F_0 es la fuerza de rozamiento

K_{eff} es la rigidez efectiva

En el caso del dispositivo pendular, la fuerza que actúa en el dispositivo no se debe únicamente a la fuerza de rozamiento, también hay que contar con la fuerza debida al movimiento pendular del dispositivo cuando la masa se desplaza del punto de reposo. Por lo que tenemos que:

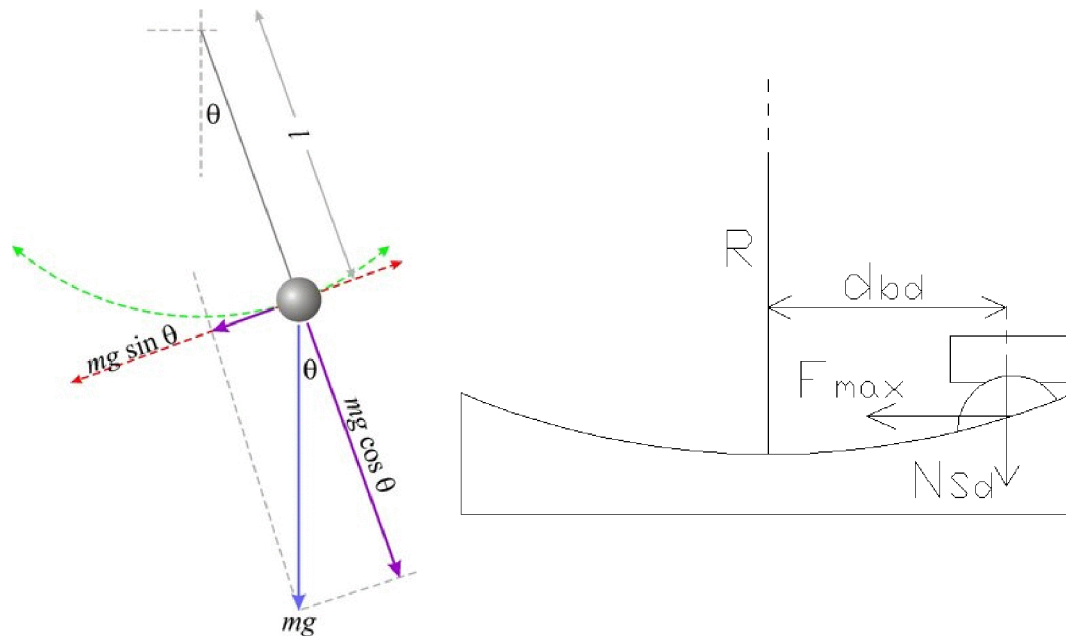
$$F_0 = \mu_d N_{sd}$$

Donde:

μ_d es el coeficiente de rozamiento superficial del dispositivo

N_{sd} es la fuerza vertical aplicada sobre el dispositivo

Una vez se produce un desplazamiento, tenemos que tener en cuenta la fuerza de recentrado producido por el comportamiento pendular. En el siguiente esquema observamos las componentes producidas en el péndulo.



$$F_{pend} = N_{sd} \cdot \sin \theta = N_{sd} \cdot \frac{d_{bd}}{R_b}$$

El vector fuerza que produce el recentrado es tangente a la superficie del apoyo, pero en el Eurocódigo 8 se permite la anterior solución para la componente horizontal si $d_{bd}/R_b < 0,25$, ya que el ángulo θ es muy pequeño. Por lo tanto nos queda la siguiente fuerza máxima horizontal:

$$F_{max} = N_{sd} \cdot \frac{d_{bd}}{R_b} + N_{sd} \cdot \mu_d$$

Donde:

R_b es el radio de la superficie de deslizamiento del aislador

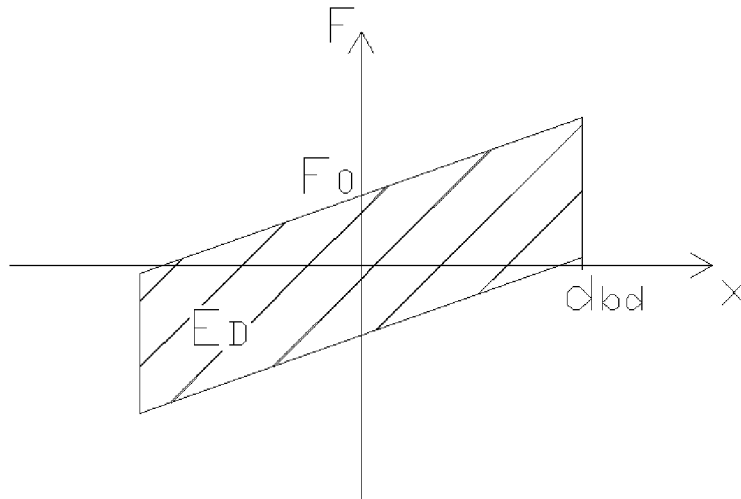
Por lo que la rigidez efectiva K_{eff} queda:

$$K_{eff} = \frac{F_{max}}{d_{bd}} = \frac{N_{sd} \cdot \frac{d_{bd}}{R_b} + N_{sd} \cdot \mu_d}{d_{bd}} = \frac{N_{sd}}{R_b} + \frac{N_{sd} \cdot \mu_d}{d_{bd}}$$

Tenemos que realizar el cálculo del amortiguamiento viscoso equivalente, que se calcula de la siguiente manera:

$$\xi_{eff} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{E_{D,i}}{E_T} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{E_{D,i}}{K_{eff} \cdot d_{bd}^2}$$

Hallamos la energía disipada en un ciclo $E_{D,i}$ (imagen), calculando el área del romboide formado por el diagrama fuerza-desplazamiento:



$$E_{D,i} = (2 \cdot F_0) \cdot (2 \cdot d_{bd}) = 4 \cdot \mu_d \cdot N_{sd} \cdot d_{bd}$$

El amortiguamiento viscoso equivalente queda de la siguiente manera:

$$\xi_{eff} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{E_{D,i}}{K_{eff} \cdot d_{bd}^2} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{4 \cdot \mu_d \cdot N_{sd} \cdot d_{bd}}{\left(\frac{N_{sd}}{R_b} + \frac{N_{sd} \cdot \mu_d}{d_{bd}}\right) \cdot d_{bd}^2}$$

$$\xi_{eff} = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{\mu_d \cdot N_{sd}}{\frac{N_{sd} \cdot d_{bd}}{R_b} + N_{sd} \cdot \mu_d} = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{\mu_d \cdot N_{sd}}{\frac{N_{sd} \cdot d_{bd} + N_{sd} \cdot \mu_d \cdot R_b}{R_b}} = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{\mu_d \cdot R_b}{d_{bd} + \mu_d \cdot R_b}$$

$$\xi_{eff} = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{1}{\left(\frac{d_{bd}}{\mu_d \cdot R_b} + 1\right)}$$

Como vemos, es muy importante el hecho de que la carga vertical sobre el apoyo no influye en el amortiguamiento. Este está en función del desplazamiento de diseño, el coeficiente de rozamiento y el radio de la superficie de deslizamiento.

c. Amortiguador viscoso

El dispositivo viscoso, tipo amortiguador, está diseñado para disipar energía sísmica o dinámica. Su principio de funcionamiento es el paso rápido de un fluido viscoso a través de un orificio estrecho que genera una gran resistencia, disipando energía en forma de calor.

DIAGRAMA FUERZA-VELOCIDAD

Estos amortiguadores de tipo viscoso están caracterizados por la siguiente relación fuerza-velocidad:

$$F = c \cdot V^{\alpha}$$

Donde:

F es la fuerza de reacción del dispositivo

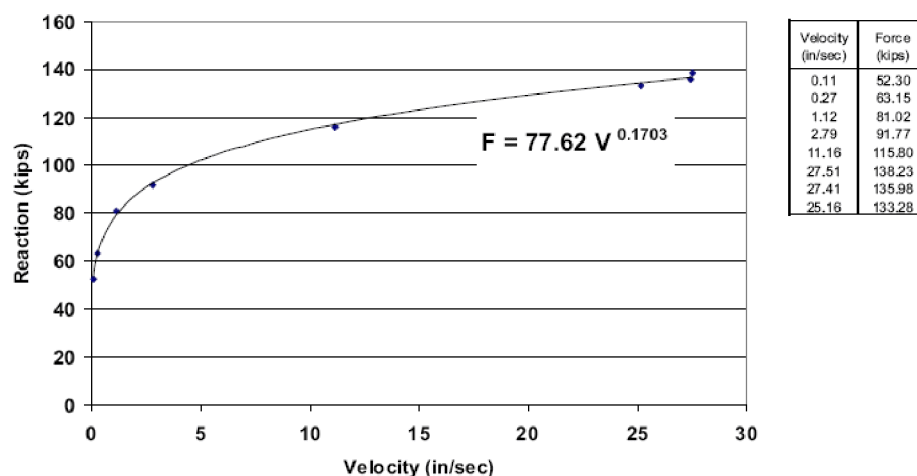
c es una constante de amortiguamiento

V es la velocidad

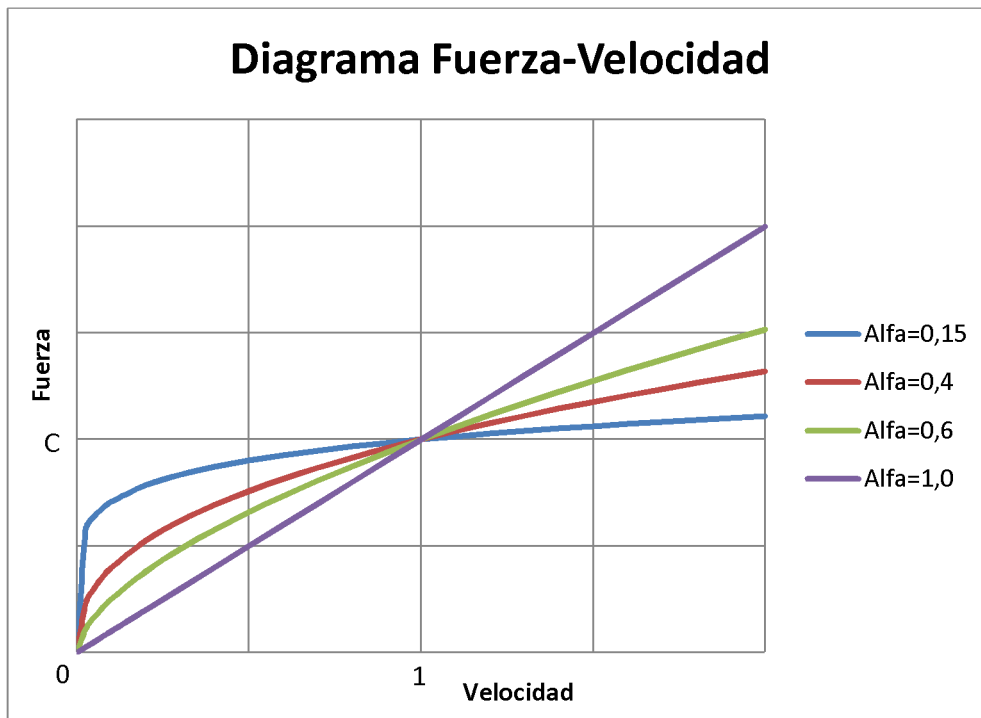
α es un exponente que describe la propiedad disipativa del amortiguador. Este valor es inferior a 1. Cuanto más bajo es el exponente, mayor es la disipación de energía.

Los parámetros intrínsecos del dispositivo, c y α , dependen del fluido especial de silicona y de la adopción del oportuno circuito hidráulico (abertura del orificio). Cada fabricante pone el máximo cuidado en la definición de estos elementos constitutivos fundamentales que representan el “corazón” del dispositivo.

En la siguiente figura vemos uno de estos ensayos de FIP-Industriale donde se determinan los parámetros c y α .



Los diagramas fuerza-velocidad para distintos valores del exponente α tienen la siguiente forma:



No conocemos el valor de c , cuando la velocidad es la unidad, $F=c$.

Suponiendo que la fuerza la mediremos en KN y la velocidad en m/s, las unidades de la constante de amortiguamiento c en función de α serán:

$$c = \left[\frac{KN}{(m/s)^\alpha} \right] = \left[\frac{KN \cdot s^\alpha}{m^\alpha} \right]$$

Normalmente para los dispositivos antisísmicos usamos valores muy pequeños de α , del entorno de 0,15.

DIAGRAMA FUERZA-DESPLAZAMIENTO

Sabiendo que en caso de sismo el desplazamiento en función del tiempo tiene una forma sinusoidal, y que este tipo de dispositivos están en función de α , tenemos que:

$$u = u_{max}(\text{sen } \omega t)$$

Donde:

u es el desplazamiento en el instante t .

u_{max} es el desplazamiento máximo.

ω es la frecuencia, $\omega = \frac{2\pi}{T_{eff}}$.

t es el tiempo.

Sabiendo la relación entre velocidad y desplazamiento:

$$V = \dot{u} = \frac{du}{dt} = \omega \cdot u_{max}(\cos \omega t)$$

Por lo que la fuerza en función del tiempo queda de la siguiente manera:

$$F = c \cdot V^\alpha = c \cdot [\omega \cdot u_{max}(\cos \omega t)]^\alpha$$

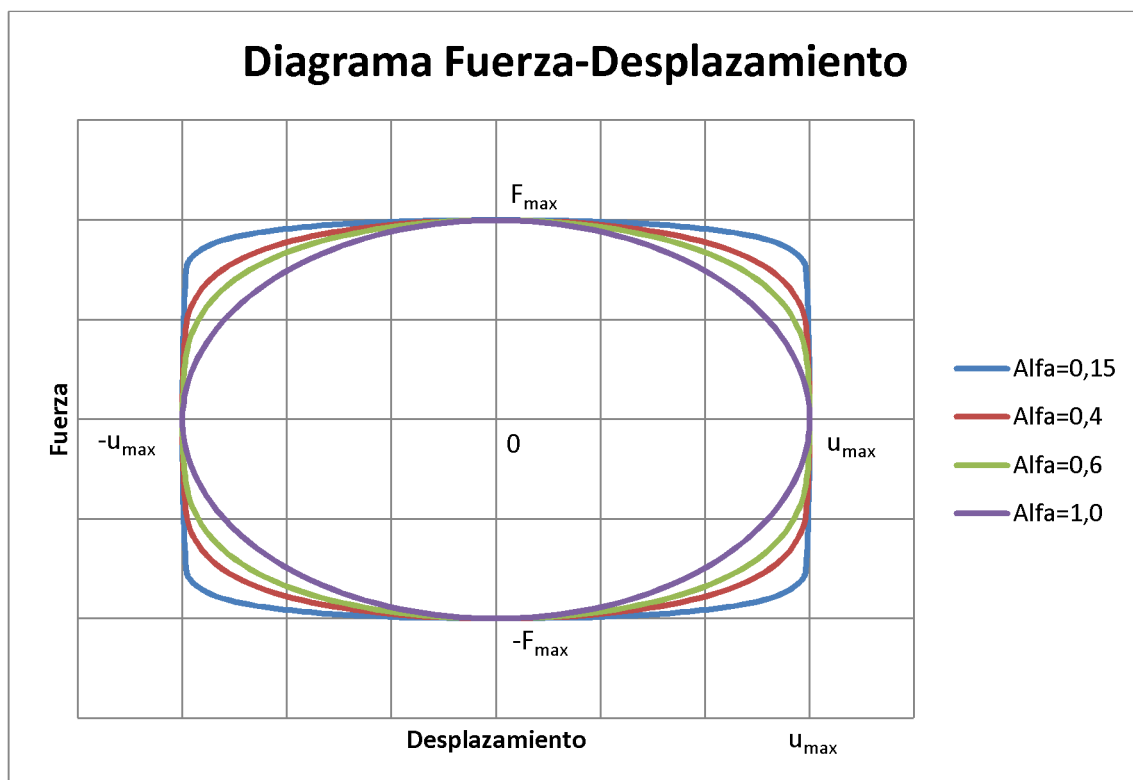
La fuerza máxima es por tanto:

$$F_{max} = c \cdot \omega^\alpha \cdot u_{max}^\alpha$$

Quedando en resumen:

$$F = F_{max} \cdot (\cos \omega t)^\alpha$$

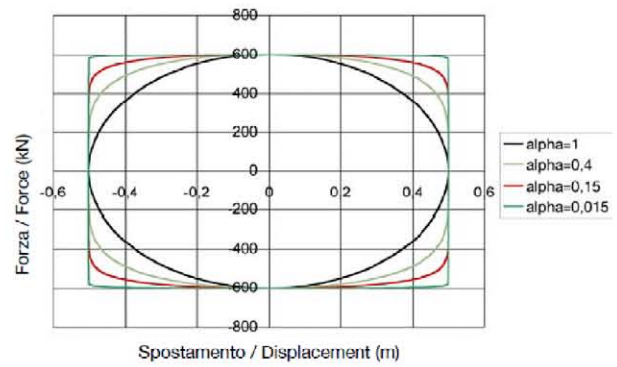
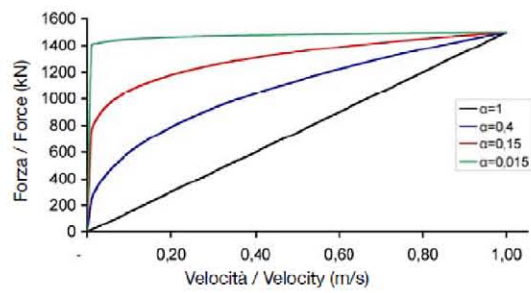
El diagrama fuerza-desplazamiento para los distintos valores de α queda de la siguiente manera:



Los valores de F_{max} y u_{max} nos los da el amortiguador utilizado, al igual que c y α .

El resto de parámetros dependen de los anteriores.

Como ejemplo, vemos los gráficos del fabricante Alga, ya visto en el apartado 3.c:

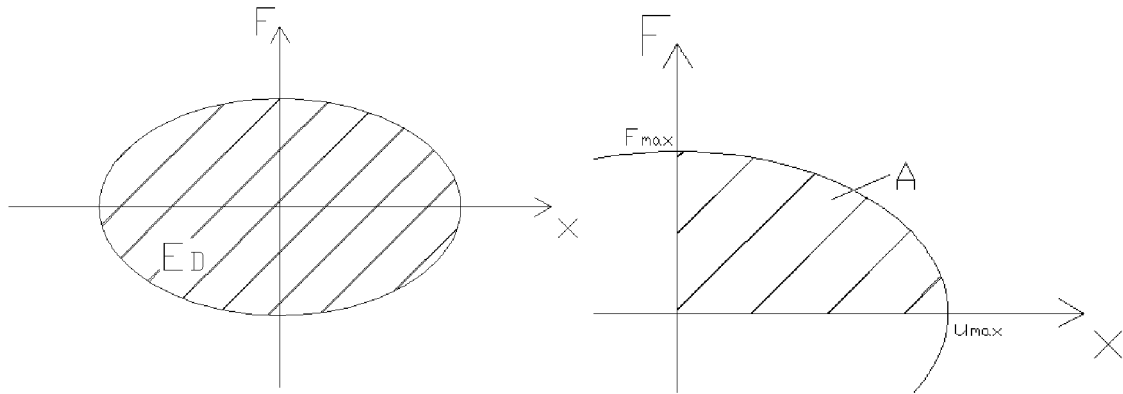


AMORTIGUAMIENTO EFECTIVO

Sabemos que el amortiguamiento efectivo es igual a:

$$\xi_{eff} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{E_{D,i}}{E_T}$$

Hallamos la energía disipada en un ciclo $E_{D,i}$ (imagen izquierda), calculado por el área A representada en la imagen derecha.



La energía disipada es $E_{D,i} = 4 \cdot A$

El área A la calculamos mediante la integral de la fuerza respecto al desplazamiento, siendo:

$$F = F_{max} \left[\cos \left(\arcsen \left(\frac{u}{u_{max}} \right) \right) \right]^\alpha$$

$$A = \int_0^{u_{max}} F du = \left[F_{max} \cdot u_{max} \cdot {}_2F_1 \left(\frac{1}{2}, -\frac{\alpha}{2}; \frac{3}{2}; \frac{u^2}{u_{max}^2} \right) \right]_0^{u_{max}}$$

Donde ${}_2F_1 \left(\frac{1}{2}, -\frac{\alpha}{2}; \frac{3}{2}; \frac{u^2}{u_{max}^2} \right)$ es una función hipergeométrica.

Resolvemos la función hipergeométrica:

$$\begin{aligned} {}_2F_1(a, b; c; z) &= \frac{\Gamma(c)}{\Gamma(b) \cdot \Gamma(c-b)} \int_0^1 t^{b-1} (1-t)^{c-b-1} (1-tz)^{-a} dt \\ &= \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(a)_k b^k \left(1 + \frac{1}{b}\right) \dots \left(1 + \frac{k-1}{b}\right)}{(c)_k b^k} \cdot \frac{(bz)^k}{k!} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
{}_2F_1\left(\frac{1}{2}, -\frac{\alpha}{2}; \frac{3}{2}; \frac{x^2}{u_{max}^2}\right) &= \\
&= \frac{\Gamma(1,5)}{\Gamma(-0,5 \cdot \alpha) \cdot \Gamma(1,5 + 0,5 \cdot \alpha)} \int_0^1 t^{-0,5\alpha-1} (1-t)^{0,5+0,5\alpha} \left(1-t \frac{x^2}{u_{max}^2}\right)^{-0,5} dt \\
&= \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(0,5)_k (-0,5\alpha)^k \left(1 + \frac{1}{-0,5\alpha}\right) \dots \left(1 + \frac{k-1}{-0,5\alpha}\right)}{(1,5)_k (-0,5\alpha)^k} \cdot \frac{(-0,5\alpha \frac{x^2}{u_{max}^2})^k}{k!}
\end{aligned}$$

Siendo $\Gamma(a)$ una función gamma y $(b)_k$ el símbolo de Pochhammer.

$$(b)_k = b(b+1)(b+2) \dots (b+k-1)$$

Por lo que la energía disipada en un cuarto de ciclo queda de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
A &= F_{max} \cdot u_{max} \cdot \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(0,5)_k \left(1 + \frac{1}{-0,5\alpha}\right) \dots \left(1 + \frac{k-1}{-0,5\alpha}\right)}{(1,5)_k} \cdot \frac{(-0,5\alpha)^k}{k!} \\
A &= F_{max} \cdot u_{max} \cdot \left(1 + \frac{0,5 \cdot (-0,5\alpha)}{1,5} + \frac{0,75 \cdot \left(1 + \frac{1}{-0,5\alpha}\right) \cdot (-0,5\alpha)^2}{7,5} + \dots\right)
\end{aligned}$$

Recordamos que la energía disipada es:

$$E_{D,i} = 4 \cdot A$$

Con lo anterior, calculamos la energía disipada para las alfas anteriores:

Para $\alpha = 1$

$$A = \int_0^{u_{max}} F du = \int_0^{u_{max}} F_{max} \cos\left(\arcsen\left(\frac{u}{u_{max}}\right)\right) du = \frac{1}{4} \pi \cdot F_{max} \cdot u_{max}$$

$$E_{D,i} = 4 \cdot \frac{1}{4} \pi \cdot F_{max} \cdot u_{max} = \pi \cdot F_{max} \cdot u_{max}$$

Para $\alpha = 0,6$

$$A = 0,854 \cdot F_{max} \cdot u_{max}$$

$$E_{D,i} = 4 \cdot 0,854 \cdot F_{max} \cdot u_{max} = 3,416 \cdot F_{max} \cdot u_{max}$$

Para $\alpha = 0,4$

$$A = 0,8955 \cdot F_{max} \cdot u_{max}$$

$$E_{D,i} = 4 \cdot 0,8955 \cdot F_{max} \cdot u_{max} = 3,582 \cdot F_{max} \cdot u_{max}$$

Para $\alpha = 0,15$

$$A = 0,9568 \cdot F_{max} \cdot u_{max}$$

$$E_{D,i} = 4 \cdot 0,9568 \cdot F_{max} \cdot u_{max} = 3,827 \cdot F_{max} \cdot u_{max}$$

Para $\alpha \approx 0$

$$A = 1 \cdot F_{max} \cdot u_{max}$$

$$E_{D,i} = 4 \cdot F_{max} \cdot u_{max}$$

En estos dispositivos viscosos, la mejora de la amortiguación debido al exponente α es pequeña, la mejora producida entre un dispositivo con $\alpha = 1$ y uno ideal de amortiguamiento máximo $\alpha \approx 0$ es tan solo de un 27,3%, ya que:

$$\frac{E_{D,i}(\alpha \approx 0) - E_{D,i}(\alpha = 1)}{E_{D,i}(\alpha = 1)} \cdot 100 = \frac{4 \cdot F_{max} \cdot u_{max} - \pi \cdot F_{max} \cdot u_{max}}{\pi \cdot F_{max} \cdot u_{max}} \cdot 100 = 27,3\%$$

5. MODELO DE CÁLCULO

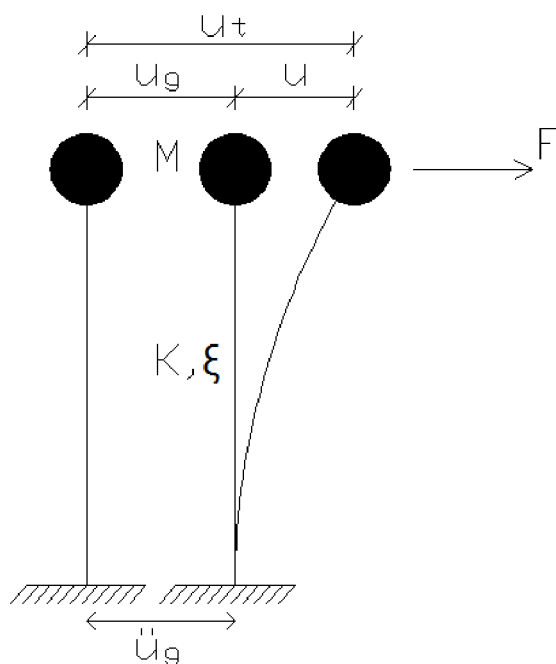
a. Descripción general

PUENTE MODELO

A pesar de que algunas directrices para la ingeniería sísmica se han implementado en los últimos años, cada estructura es única, tiene que calcularse de forma individual y requiere componentes hechos a medida.

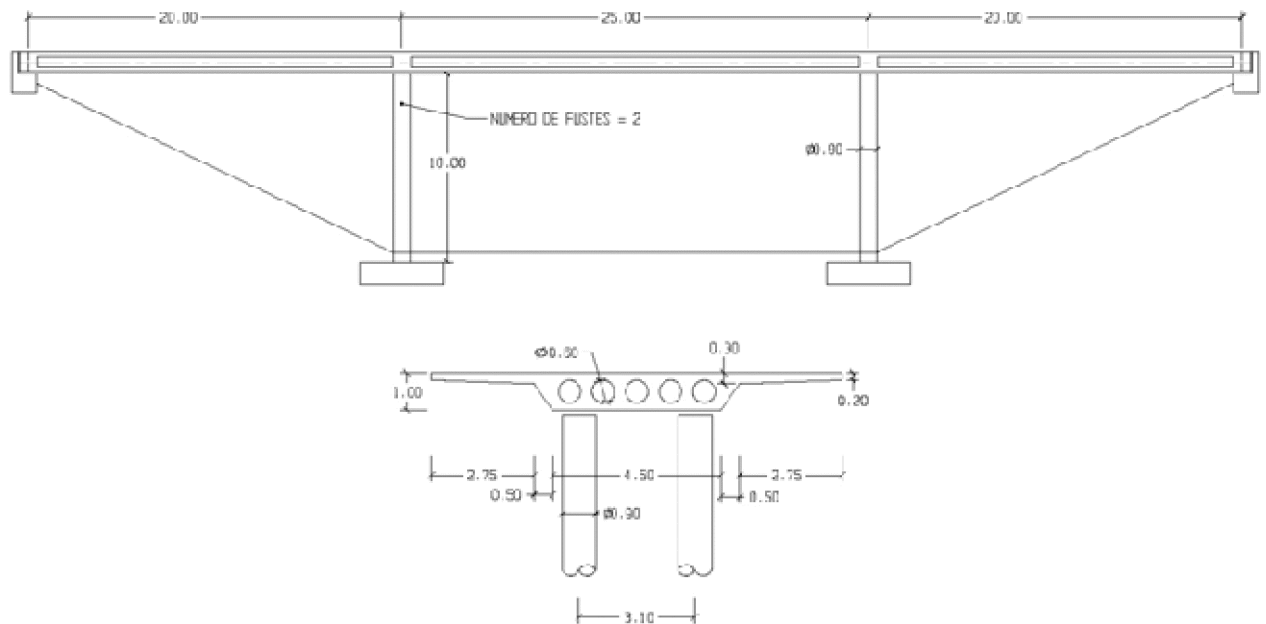
Tenemos que incluir los dispositivos antisísmicos dentro de una estructura, en este caso un puente. Para ello vamos a realizar la discretización de un sistema de un grado de libertad, una masa concentrada con una pila sin masa. Para poder considerar esta simplificación se tiene que cumplir que:

- La masa de cada pila sea inferior al 20% de la masa del tablero que soporta dicha pila.
- La distancia entre el centro de gravedad del tablero y el centro de rigidez de los elementos sustentadores no supere el 5% de la longitud del tablero.

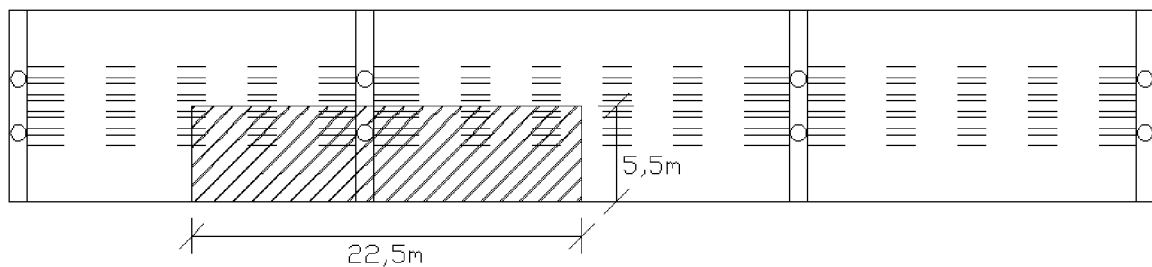


Vamos a realizar el ejemplo con un puente que calcularemos con un modelo de pila aislada. Este modelo se emplea cuando el sismo es resistido por cada pila, sin que exista interacción con las demás. Este modelo se diferencia del tablero rígido en que se analiza cada pila independientemente con la parte proporcional de tablero, mientras que en el anterior se analiza todo el tablero de una sola vez.

En la siguiente imagen se muestra el modelo de puente que ponemos como ejemplo:



Calculamos la masa de la parte proporcional del tablero asociada a cada pila:



Como dijimos anteriormente, la masa de la pila debe ser inferior al 20% de la masa del tablero.

El pavimento y las aceras no se tienen en cuenta en este estudio, aunque en los casos reales habría que incluirlos. La masa del tablero y pila es:

- Masa del tablero

Área de media sección de tablero (maciza):

$$A_{maciza} = 1 \cdot 2,25 + \frac{0,5 \cdot 0,7}{2} + 0,3 \cdot 0,5 + \frac{0,2 + 0,3}{2} \cdot 2,75 = 3,2625 \text{ m}^2$$

Área de los aligeramientos de media sección:

$$A_{aligeramientos} = 2,5 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 0,60^2 = 0,7068 \text{ m}^2$$

Volumen del tablero:

$$V = 22,5 \cdot 3,2625 - 21,5 \cdot 0,7068 = 58,21 \text{ m}^3$$

Masa del tablero:

$$M = V \cdot \rho = 2500 \cdot 58,21 = 145525 \text{ Kg}$$

- Masa de la pila

Volumen de la pila:

$$V = 10 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 0,90^2 = 6,36 \text{ m}^3$$

Masa de la pila:

$$M = V \cdot \rho = 6,36 \cdot 2500 = 15900 \text{ Kg}$$

La pila representa el 10,92% de la masa del tablero, por lo que podemos realizar la simplificación del sistema de un grado de libertad.

A esta masa hay que sumarle la masa debida a la combinación cuasipermanente de las sobrecargas:

$$M_{sc} = 400 \cdot 22,5 \cdot 5,5 + 60000 = 109500 \text{ Kg}$$

$$M_{cp,sc} = \psi_2 \cdot M_{sc} = 0,2 \cdot 109500 = 21900 \text{ Kg}$$

La masa del oscilador es igual a la masa del tablero más la mitad de la masa de la pila y la masa de la combinación cuasipermanente de sobrecargas:

$$M = 145525 + 21900 + \frac{15900}{2} = 175375 \text{ Kg}$$

Para hallar la rigidez del sistema de un grado de libertad, tenemos que hallar la rigidez de las pilas y de los dispositivos (neoprenos o apoyos antisísmicos).

La rigidez de cada pila es:

$$K_{pila} = \frac{3EI}{h^3} = \frac{3 \cdot 3 \cdot 10^{10} \cdot \frac{\pi \cdot 0,45^4}{4}}{10^3} = 2,898 \cdot 10^6 \text{ N/m}$$

La rigidez del conjunto pila-dispositivo es:

$$K_{conj} = \frac{1}{\frac{1}{K_{pila}} + \frac{1}{K_{disp}}}$$

Una vez halladas las rigideces de cada uno de los conjuntos pilas-apoyos se halla la rigidez global, pero en nuestro caso, como usamos el modelo de pila aislada, no tendremos que calcular la rigidez global del sistema.

$$K_{global} = \sum K_{conj}$$

El amortiguamiento del sistema de un grado de libertad depende del tipo de estructura y del dispositivo antisísmico utilizado, en su caso.

Cuando usamos apoyos convencionales de neopreno zunchado, se supondrá un índice de amortiguamiento igual al resto de la estructura. En el NCSP-07 encontramos los valores recomendados por la norma para cada tipo de estructura y sismo.

En la tabla siguiente aparecen los valores recomendados para el índice de amortiguamiento ξ (en porcentaje):

Tipo de estructura	Bajo la acción del sismo frecuente de cálculo	Bajo la acción del sismo último de cálculo
Puentes de acero	2	4
Puentes de hormigón pretensado		
Puentes mixtos		
Puentes de hormigón armado	3	5

En caso de usar otros dispositivos especiales de apoyo como elastómeros con núcleo de plomo ó dispositivos pendulares, debemos justificar adecuadamente un valor distinto.

La estructura tiene un amortiguamiento del 5% y el dispositivo tiene un amortiguamiento propio, normalmente mayor del 5%. El amortiguamiento equivalente es el usado para hallar el espectro de aceleraciones, y se halla de la siguiente manera:

$$\xi_{eq} = \frac{\sum \xi_i \cdot E_{di}}{\sum E_{di}} = \frac{\sum \xi_i \cdot F \cdot d_i}{\sum F \cdot d_i} = \frac{\xi_{pila} \cdot d_{pila} + \xi_{disp} \cdot d_{disp}}{d_{pila} + d_{disp}}$$

Pero no conocemos el desplazamiento de la pila y del dispositivo ya que necesitamos el amortiguamiento equivalente para hallar el espectro de desplazamientos. Por tanto utilizaremos las rigideces para hallar el amortiguamiento equivalente.

$$F_{pila} = F_{disp} \rightarrow K_{pila} \cdot d_{pila} = K_{disp} \cdot d_{disp}$$

Quedando la ecuación del amortiguamiento equivalente:

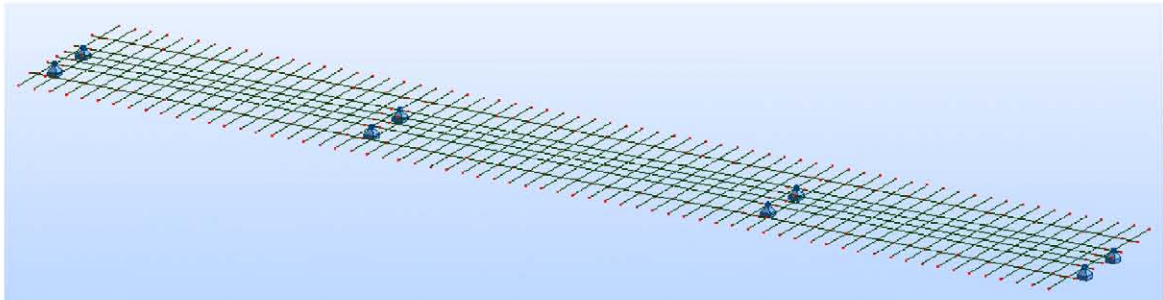
$$\xi_{eq} = \frac{\xi_{pila} \cdot \frac{K_{disp}}{K_{pila}} d_{disp} + \xi_{disp} \cdot d_{disp}}{\frac{K_{disp}}{K_{pila}} d_{disp} + d_{pila}} = \frac{\xi_{pila} \cdot \frac{K_{disp}}{K_{pila}} + \xi_{disp}}{\frac{K_{disp}}{K_{pila}} + 1}$$

$$\xi_{eq} = \frac{\xi_{pila} \cdot K_{disp} + \xi_{disp} \cdot K_{pila}}{K_{disp} + K_{pila}}$$

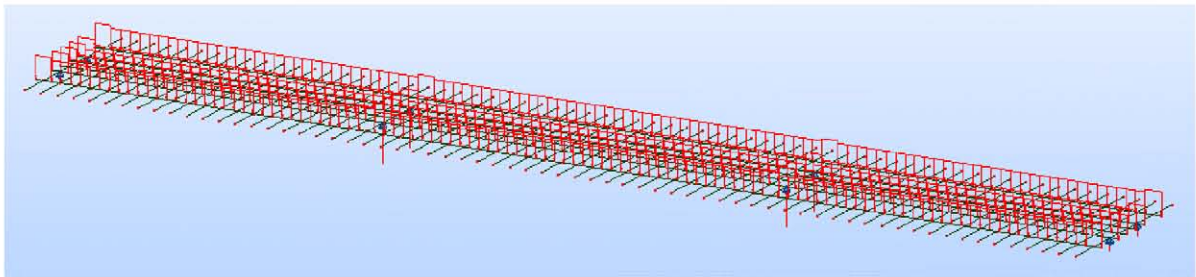
CARGA VERTICAL SOBRE EL APOYO

En primer lugar debemos de dimensionar el neopreno para su carga vertical.

Para ello vamos a realizar un emparrillado que defina el tablero elegido. Se tienen en cuenta las distintas inercias, tanto transversales como longitudinales, distinguiendo entre las secciones macizas y las aligeradas. El programa utilizado es Autodesk Robot Structural Analysis:



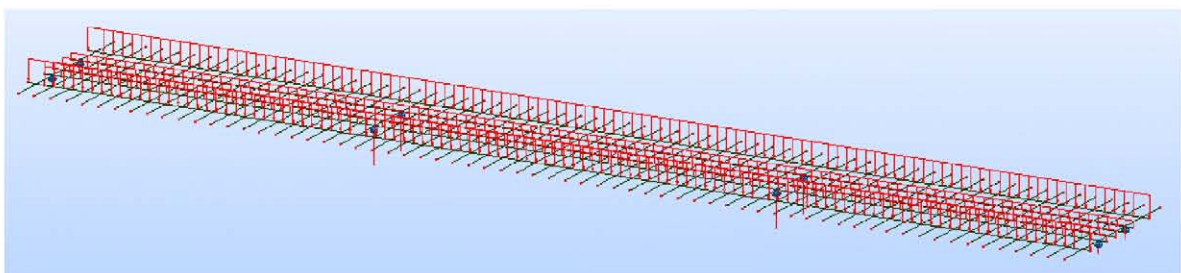
CARGA PERMANENTE:



La carga vertical sobre las pilas y estribos es:

$$R_{cp,pila} = 1619,57 \text{ KN} \quad ; \quad R_{cp,estribo} = 524,14 \text{ KN}$$

SOBRECARGA UNIFORME

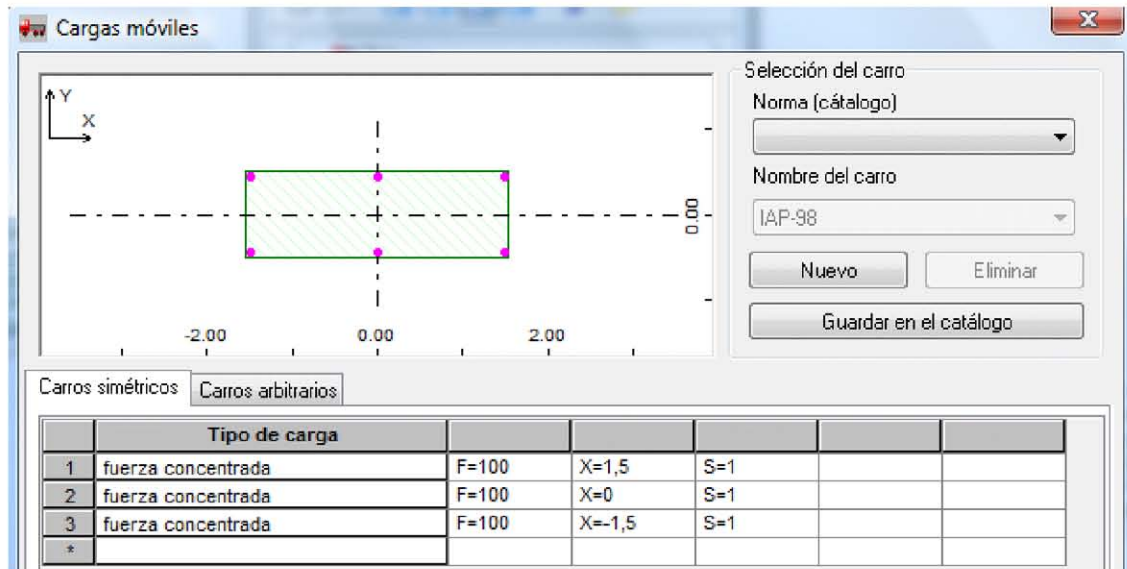


La carga vertical sobre las pilas y estribos es:

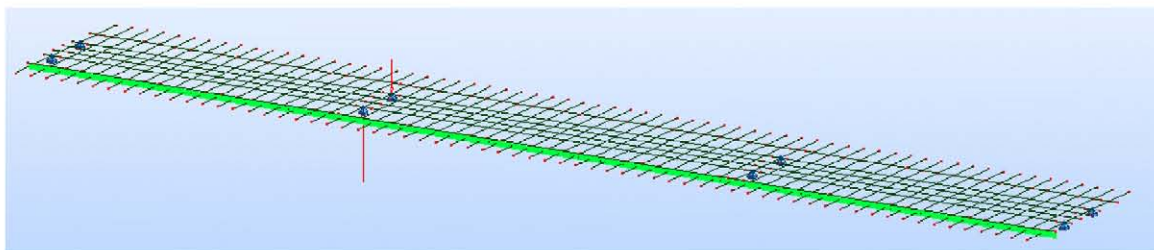
$$R_{scu,pila} = 551,60 \text{ KN} \quad ; \quad R_{scu,estribo} = 174,40 \text{ KN}$$

SOBRECARGA PUNTUAL

Hacemos pasar el carro de cargas de 600 KN definido por la IAP, las cargas exteriores pasarán a 0,5 metros del borde de la estructura. Obtenemos la carga más desfavorable para las pilas y estribos. En la siguiente imagen podemos ver el carro de cargas definido.



La imagen nos muestra la carga en el momento de pasar por el punto $x=20,5$ m del tablero.



Existen reacciones de levantamiento en el apoyo opuesto a la carga para el caso más desfavorable, pero son menores que las producidas por el peso propio.

La carga vertical sobre las pilas y estribos es:

$$R_{sc,pila} = 1066,92 \text{ KN} \quad ; \quad R_{sc,estribo} = 940,75 \text{ KN}$$

CARGA VERTICAL SOBRE EL APOYO

La carga permanente sobre las pilas es:

$$V_{perm,pila} = 1619,57 \text{ KN}$$

La carga máxima sobre las pilas (carga permanente + sobrecarga) es:

$$V_{max} = 1619,57 + 551,60 + 1066,92 = 3238,09 \text{ KN}$$

La carga permanente sobre el apoyo del estribo es:

$$V_{perm,estribo} = 524,14 \text{ KN}$$

La carga máxima sobre el apoyo del estribo (carga permanente + sobrecarga) es:

$$V_{max} = 524,14 + 174,40 + 940,75 = 1639,29 \text{ KN}$$

ESPECTRO DE ACELERACIONES

Para realizar el espectro de aceleraciones tomaremos como ejemplo de sismo el presentado para Granada capital, con una aceleración básica de 0,23g, una de las más altas de España.

Tenemos en cuenta que el terreno de Granada está formado en gran parte por el llamado "Conglomerado Alhambra", terreno formado por cantos redondeados unidos por un cemento. TERRENO TIPO III, Coeficiente C = 1,6.

Consideramos un factor de importancia especial para el puente, tomando:

$$\rho = \gamma_I \cdot \gamma_{II} = 1,3$$

El coeficiente de amplificación del terreno es:

$$S = \frac{C}{1,25} + 3,33 \left(\rho \frac{a_b}{g} - 0,1 \right) \left(1 - \frac{C}{1,25} \right) \quad \text{para} \quad 0,1g < \rho a_b < 0,4g$$

$$S = \frac{1,6}{1,25} + 3,33(1,3 \cdot 0,23 - 0,1) \left(1 - \frac{1,6}{1,25} \right) = 1,0944$$

La aceleración sísmica horizontal de cálculo queda:

$$a_c = S \cdot \rho \cdot a_b = 1,0944 \cdot 1,3 \cdot 0,23g = 0,327g$$

Construcción del espectro

Valores del periodo que delimitan el espectro (T_A , T_B , T_C) para el sismo último de cálculo:

$K = 1$; se trata de un sismo cercano al epicentro.

$$T_A = K \cdot \frac{C}{10} = \frac{1,6}{10} = 0,16 \text{ s}$$

$$T_B = K \cdot \frac{C}{2,5} = \frac{1,6}{2,5} = 0,64 \text{ s}$$

$$T_C = K \cdot (2 + C) = 2 + 1,6 = 3,6 \text{ s}$$

Como no conocemos el factor de corrección dependiente del amortiguamiento, dejaremos el valor de la respuesta elástica de aceleraciones en función de este factor.

El factor de corrección dependiente del amortiguamiento es:

$$\nu = \left(\frac{5}{\xi}\right)^{0,4} \geq 0,55 \quad \text{para } \xi > 1\%$$

Respuesta elástica de aceleraciones $S_a(T)$:

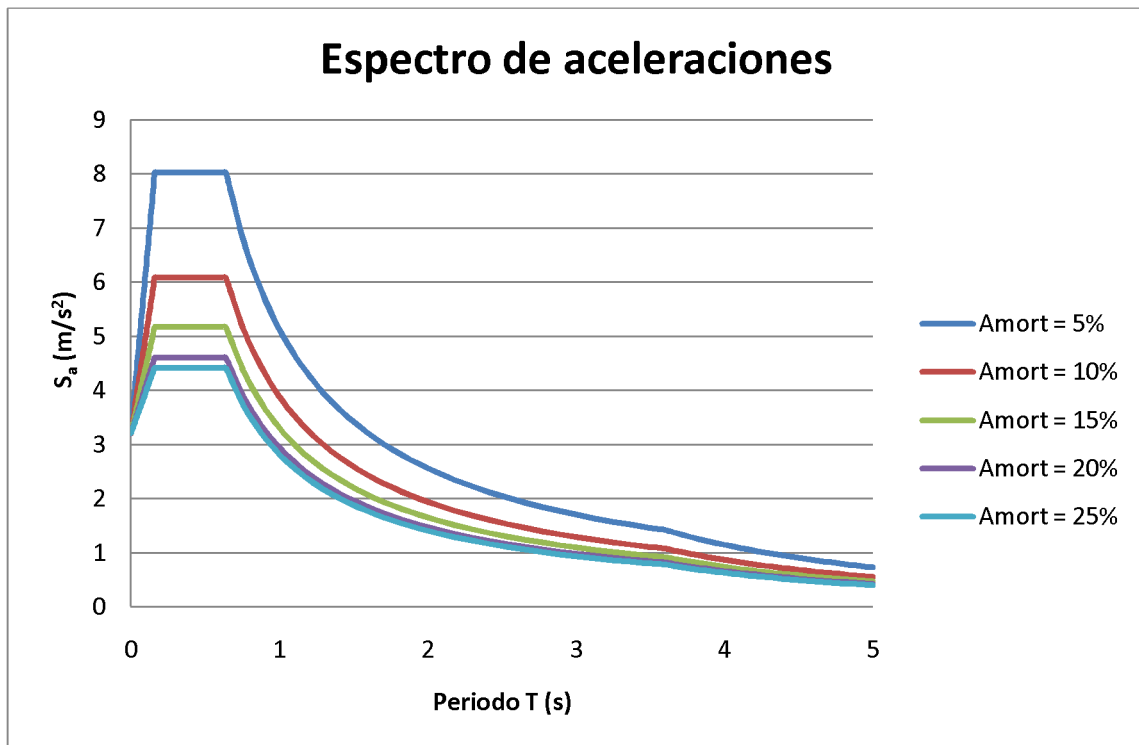
$$0 \leq T \leq T_A \quad S_a(T) = \left[1 + \frac{T}{T_A} (2,5\nu - 1)\right] a_c$$

$$T_A \leq T \leq T_B \quad S_a(T) = 2,5 \cdot \nu \cdot a_c$$

$$T_B \leq T \leq T_C \quad S_a(T) = 2,5 \cdot \nu \cdot \frac{T_B}{T} \cdot a_c$$

$$T_C \leq T \quad S_a(T) = 2,5 \cdot \nu \cdot \frac{T_B \cdot T_C}{T^2} \cdot a_c$$

En el siguiente gráfico vemos el espectro de aceleraciones definido anteriormente para la ciudad de Granada, distinguiendo en él distintos valores del amortiguamiento:



La disminución de la aceleración entre un amortiguamiento del 20% y del 25% es mínima, tenemos que cumplir la condición $\nu = \left(\frac{5}{\zeta}\right)^{0,4} \geq 0,55$, por lo que el diagrama no varía para un amortiguamiento mayor de 22,287%.

Con el espectro de aceleraciones obtenido, realizamos el cálculo de las sollicitaciones en la estructura.

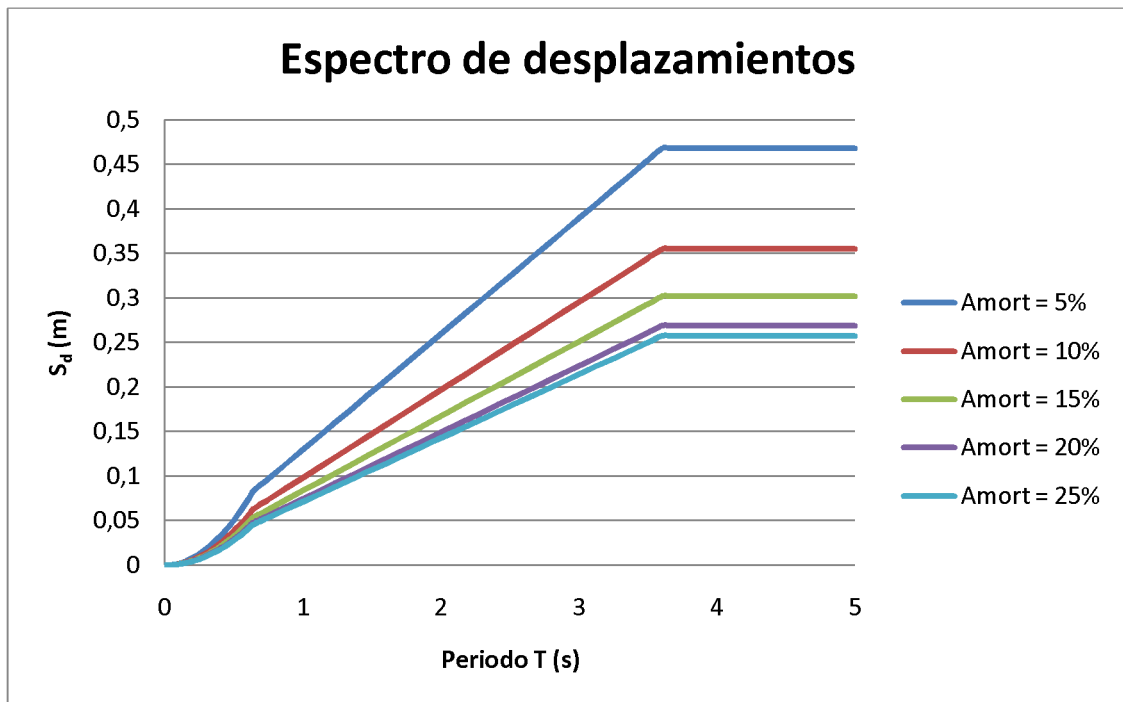
El periodo natural de la estructura es:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{K/M}} = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K}}$$

Con este valor entramos en el espectro de aceleraciones y tomamos el valor de S_a para dicho periodo. Con el valor de S_a y el periodo hallamos el máximo desplazamiento producido en el tablero S_d :

$$S_d = S_a \left(\frac{T}{2\pi} \right)^2$$

En el gráfico siguiente tenemos el espectro de desplazamientos para distintos valores del amortiguamiento:



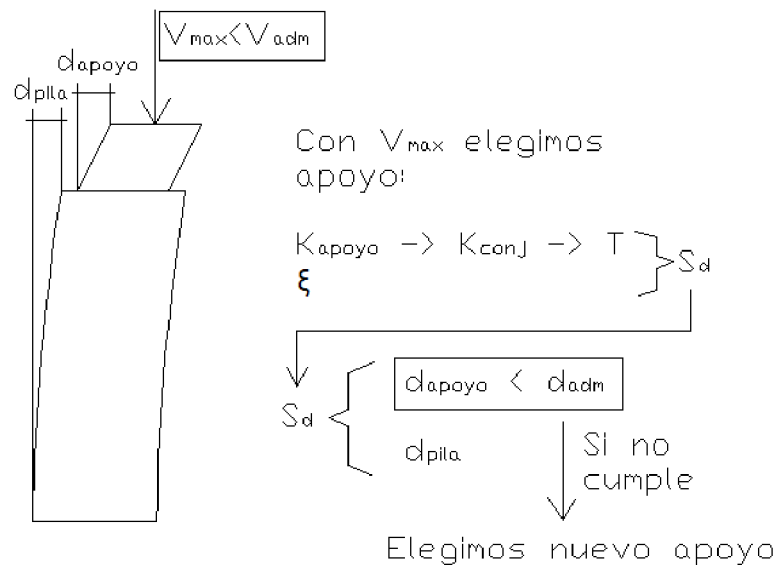
Observamos en el diagrama la gran importancia de aumentar el índice de amortiguamiento de la estructura.

b. Uso de apoyos de neopreno convencionales

Los apoyos de neopreno usados tienen que cumplir dos condiciones esenciales: la carga vertical a la que es sometida el neopreno tiene que ser inferior a la carga admisible de este y el máximo desplazamiento producido en el neopreno debido al evento sísmico debe ser menor que el desplazamiento admisible:

$$V_{max} \leq V_{adm} \quad ; \quad d_{apoyo} \leq d_{adm}$$

El esquema de cálculo a seguir es el siguiente:



Explicamos el proceso más detalladamente con cada uno de los cálculos:

- **Dimensionamos en planta el apoyo** de neopreno mínimo para su carga vertical.

La carga vertical de trabajo admisible es de 15 N/mm^2 . (En el ejemplo utilizaremos apoyos cilíndricos debido a la forma circular de la pila).

El área mínima de la sección del apoyo es:

$$A > \frac{V_{max}}{\sigma_{adm}} \quad ; \quad \text{Ej: } A > \frac{3238090}{15} = 215873 \text{ mm}^2$$

Normalmente los apoyos son rectangulares o circulares.

Para apoyos rectangulares:

$$A = a \cdot b \rightarrow a, b = \text{longitudes laterales del apoyo}$$

Para apoyos circulares:

$$A = \frac{\pi \cdot \phi^2}{4} \rightarrow \phi = 2 \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad ; \quad \text{Ej: } \phi \geq 2 \sqrt{\frac{215873}{\pi}} = 524,27 \text{ mm}$$

Dimensionamos los apoyos para diámetros múltiplos de 50 mm.

- **Elegimos la altura del apoyo** que estará en relación directa con la deformación admisible del apoyo. Hay múltiples alturas según fabricantes, pero tomamos unos límites razonables por estabilidad:

$$0,1 \leq \frac{t}{\phi} \leq 0,3 \quad t = \text{altura del apoyo}$$

En casos de eventos sísmicos los valores suelen ser cercanos a $t = 0,3 \cdot \phi$

Dimensionamos los apoyos para alturas múltiplos de 10 mm.

- **Hallamos la deformación tangencial admisible**, es decir, el desplazamiento admisible.

$$\text{Para } 0,1 \leq \frac{t}{\phi} \leq 0,2 \rightarrow d_{adm} = 0,7 \cdot t$$

$$\text{Para } 0,2 \leq \frac{t}{\phi} \leq 0,3 \rightarrow d_{adm} = t \cdot \left(0,9 - \frac{t}{\phi}\right)$$

ϕ para apoyo circular o menor dimensión en planta para apoyo rectangular

- **Determinamos la rigidez del apoyo**

$$K_{apoyo} = \frac{G \cdot A}{t}$$

La norma NCSP-07 considera dos valores máximo y mínimo del módulo de elasticidad transversal:

$$G_{b,máx} = 1,65 \cdot G$$

$$G_{b,mín} = 0,9 \cdot G$$

Siendo G el módulo de elasticidad transversal convencional aparente del elastómero ($G=0,9 \text{ N/mm}^2$). La rigidez del apoyo para cargas dinámicas o rápidas viene determinada por el valor máximo, por lo que queda:

$$K_{apoyo} = \frac{G_{b,máx} \cdot A}{t} = \frac{1,65 \cdot G \cdot A}{t}$$

- **Calculamos la rigidez conjunta pila-apoyo**, necesaria para hallar el periodo propio de vibración de la estructura:

$$K_{conj} = \frac{1}{\frac{1}{K_{pila}} + \frac{1}{K_{apoyo}}}$$

- **Determinamos el periodo propio:**

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K_{conj}}}$$

- **Hallamos el valor en el espectro de aceleraciones o de desplazamientos**, gracias a que conocemos el periodo propio de vibración y el amortiguamiento ($\xi = 5\%$).

$$\left. \begin{matrix} T \\ \xi \end{matrix} \right\} S_a ; S_d$$

- **Calculamos el cortante y el momento a los que se ve sometido la base del pilar**, podemos utilizar tanto la ecuación de rigidez por desplazamiento como la de masa por aceleración para hallar la fuerza:

$$F = K_{conj} \cdot S_d = M \cdot S_a$$

$$M_f = F \cdot h \quad \text{siendo } h \text{ la altura del pilar}$$

- Comprobamos que el apoyo cumple la condición de desplazamiento:

$$F = K_{apoyo} \cdot d_{apoyo} \rightarrow d_{apoyo} = \frac{F}{K_{apoyo}}$$

Se tiene que cumplir que:

$$d_{apoyo} < d_{adm}$$

- Si la condición anterior se cumple, podemos aceptar el apoyo como válido, si no lo es, tenemos que buscar un nuevo apoyo comenzando de nuevo todo el proceso.

Siguiendo los pasos anteriores y teniendo en cuenta las limitaciones impuestas durante el proceso, se ha realizado una hoja de cálculo Excel en la que se ha comprobado la validez de cada uno de los posibles dispositivos.

En la siguiente tabla tenemos cada uno de los dispositivos válidos con el esfuerzo cortante y el momento al que se ve sometida la base del pilar:

Dimensión (Ø) mm	Altura (t) mm	F (Cortante) KN	M (Momento) mKN
750	140	458,13	4581,3
750	150	452,00	4520,0
750	160	446,12	4461,2
750	170	440,45	4404,5
800	90	501,73	5017,3
800	100	494,66	4946,6
800	110	487,88	4878,8
800	120	481,38	4813,8
800	130	475,13	4751,3
800	140	469,11	4691,1
800	150	463,32	4633,2
800	160	457,74	4577,4
800	170	452,35	4523,5
800	180	447,16	4471,6
800	190	442,13	4421,3
800	200	437,27	4372,7
800	210	432,57	4325,7
800	220	428,02	4280,2
800	230	423,61	4236,1

Todos los dispositivos por encima de los 550 mm de diámetro cumplen por carga vertical, pero no por desplazamientos.

No encontramos dispositivos por encima de los 800 mm por limitaciones de tamaño de la pila, que tiene que dejar un pequeño resguardo a la colocación del apoyo.

Vemos que aunque con los apoyos de 800 mm de diámetro y gran altura llegamos a cortantes menores, con los apoyos de 750 mm se consigue una reducción óptima y con menores valores de la altura del apoyo. Esto es debido a que el ahorro está determinado por la rigidez del apoyo.

c. Uso de apoyos elastoméricos con núcleo de plomo

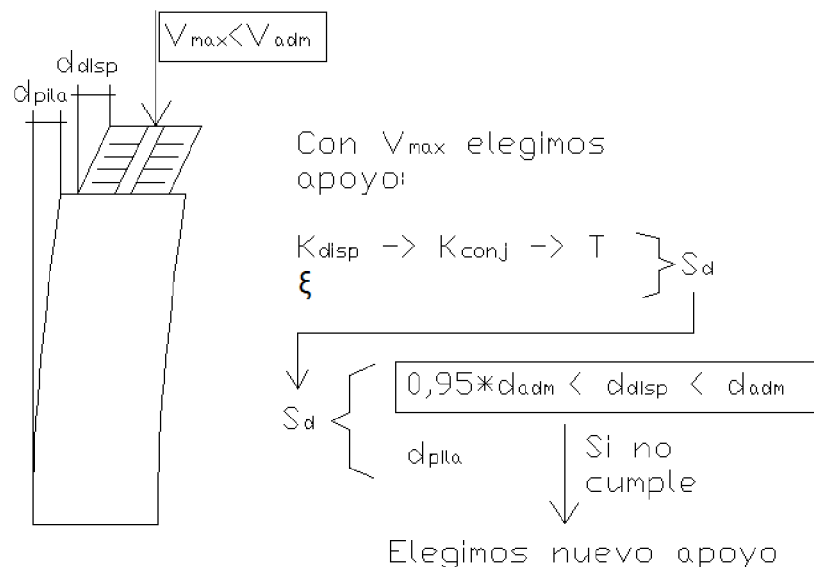
Los apoyos elastoméricos con núcleo de plomo usados tienen que cumplir dos condiciones esenciales: la carga vertical a la que es sometida el apoyo tiene que ser inferior a la carga admisible de este y el máximo desplazamiento producido en él debido al evento sísmico debe ser cercano al desplazamiento admisible:

$$V_{max} \leq V_{adm} \quad ; \quad d_{apoyo} \approx d_{adm}$$

Dado que el comportamiento del dispositivo es fuertemente no lineal, implica que tanto la rigidez eficaz (K_{eff}) como el amortiguamiento viscoso eficaz (ξ_{eff}) son válidos solo para el desplazamiento de proyecto dado (d_{adm}). Por ese motivo el desplazamiento producido tiene que ser cercano al desplazamiento admisible. Suponemos que para dar por válido el dispositivo se deberá cumplir que:

$$d_{adm} \geq d_{apoyo} \geq 0,95 \cdot d_{adm}$$

El esquema de cálculo a seguir es el siguiente:



Explicamos el proceso más detalladamente con cada uno de los cálculos:

- **Elegimos el dispositivo** a utilizar, teniendo en cuenta la carga vertical máxima que soporta el apoyo.

Utilizamos dispositivos reales dados en las tablas de fabricantes, ya que se usan distintos materiales y características dependiendo del fabricante, aunque su comportamiento sea similar.

El dispositivo nos proporcionará una serie de datos:

$$K_{disp} = K_{eff} \rightarrow \text{Rigidez efectiva del dispositivo}$$

$$\xi_{disp} = \xi_{eff} \rightarrow \text{Amortiguamiento efectivo del dispositivo}$$

$d_{adm} \rightarrow$ Desplazamiento admisible máximo o desplazamiento de proyecto

- **Calculamos la rigidez conjunta pila-apoyo**, necesaria para hallar el periodo propio de vibración de la estructura, obtenemos la rigidez del apoyo al elegir el dispositivo.

$$K_{conj} = \frac{1}{\frac{1}{K_{pila}} + \frac{1}{K_{disp}}}$$

- **Calculamos el amortiguamiento equivalente del conjunto**, tal como hemos visto anteriormente.

$$\xi_{eq} = \frac{\xi_{pila} \cdot K_{disp} + \xi_{disp} \cdot K_{pila}}{K_{disp} + K_{pila}}$$

- **Determinamos el periodo propio:**

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K_{conj}}}$$

- **Hallamos el valor en el espectro de aceleraciones o de desplazamientos**, gracias a que conocemos el periodo propio de vibración y el amortiguamiento equivalente del conjunto.

$$\left. \begin{matrix} T \\ \xi_{eq} \end{matrix} \right\} S_a ; S_d$$

- **Calculamos el cortante y el momento a los que se ve sometida la base del pilar**, podemos utilizar tanto la ecuación de rigidez por desplazamiento como la de masa por aceleración para hallar la fuerza:

$$F = K_{conj} \cdot S_d = M \cdot S_a$$

$$M_f = F \cdot h \quad \text{siendo } h \text{ la altura del pilar}$$

- **Comprobamos que el apoyo cumple la condición de desplazamiento:**

$$F = K_{disp} \cdot d_{disp} \rightarrow d_{disp} = \frac{F}{K_{disp}}$$

Se tiene que cumplir que:

$$0,95 \cdot d_{adm} < d_{disp} \leq d_{adm}$$

- **Si la condición anterior se cumple, podemos aceptar el apoyo como válido, si no lo es, tenemos que buscar un nuevo apoyo comenzando de nuevo todo el proceso.**

Siguiendo los pasos anteriores y gracias a las tablas de los fabricantes, vamos a seleccionar los dispositivos que cumplen las condiciones expuestas anteriormente.

Usamos las tablas de los fabricantes FIP y ALGA. Se ha realizado una hoja de cálculo Excel en la que se ha comprobado la validez de cada uno de los posibles dispositivos.

En la siguiente tabla tenemos el nombre del dispositivo (nos da datos de diámetro y altura de este), el amortiguamiento proporcionado, su desplazamiento de proyecto, además del esfuerzo cortante y el momento al que se ve sometida la base del pilar:

Dispositivo	Amortiguamiento disp. (%)	d_{adm} mm	F (cortante) KN	M (Momento) mKN
LRB-S 800/128-130	29	83	262,48	2624,8
LRB-S 850/128-130	27	83	275,03	2750,3
LRB-SN 650/114-130	28	83	270,24	2702,4
LRB-S 500/100-110	31	125	190,41	1904,1

Aunque el último dispositivo tiene un 31% de amortiguamiento, el amortiguamiento equivalente de la estructura es del 17,38%, por lo que cumple la condición de que el amortiguamiento debe ser inferior al 30% para poder realizar el cálculo simplificado.

Los dispositivos del fabricante FIP se nombran de la siguiente manera:

Los apoyos elastoméricos con núcleo de plomo se identifican mediante las siglas LRB (Lead Rubber Bearing), seguida de una o más letras (S para $G = 0,4$ MPa o SN para $G = 0,6$ MPa, para indicar el tipo de compuesto de la goma) y de tres cifras. La primera representa el diámetro externo del apoyo en milímetros, la segunda el espesor total de la capa de goma en milímetros, la tercera el diámetro del núcleo de plomo en milímetros.

Habría que estudiar si el dispositivo de 850 mm de diámetro puede ser instalado en la pila.

d. Uso de dispositivos pendulares

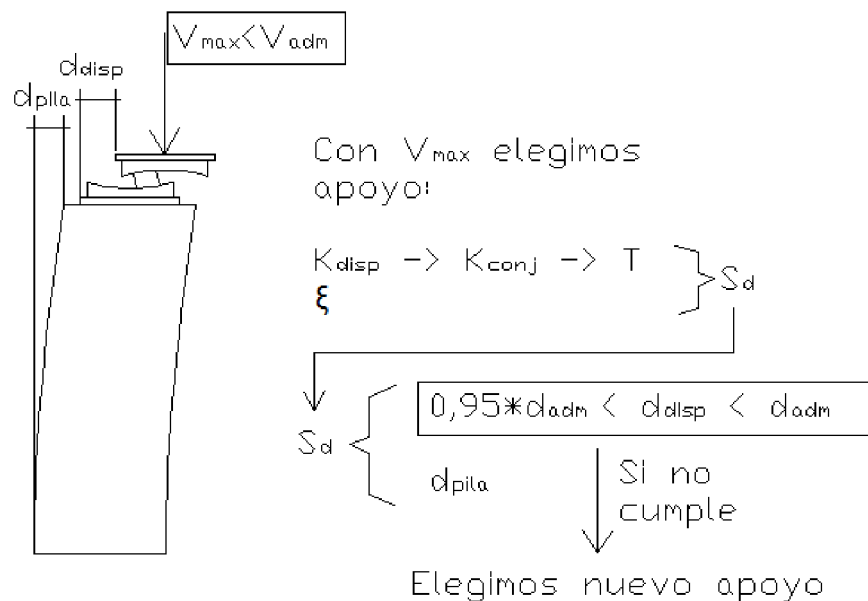
Los dispositivos pendulares usados tienen que cumplir dos condiciones esenciales: la carga vertical a la que es sometido el apoyo tiene que ser inferior a la carga admisible de este y el máximo desplazamiento producido en él debido al evento sísmico debe ser cercano al desplazamiento admisible:

$$V_{max} \leq V_{adm} \quad ; \quad d_{apoyo} \approx d_{adm}$$

Dado que el comportamiento del dispositivo es fuertemente no lineal, implica que tanto la rigidez eficaz (K_{eff}) como el amortiguamiento viscoso eficaz (ξ_{eff}) son válidos solo para el desplazamiento de proyecto dado (d_{adm}). Por ese motivo el desplazamiento producido tiene que ser cercano al desplazamiento admisible. Suponemos que para dar por válido el dispositivo se deberá cumplir que:

$$d_{adm} \geq d_{apoyo} \geq 0,95 \cdot d_{adm}$$

El esquema de cálculo a seguir es el siguiente:



Explicamos el proceso más detalladamente con cada uno de los cálculos:

- **Elegimos el dispositivo** a utilizar, teniendo en cuenta la carga vertical máxima que soporta el apoyo.

Utilizamos dispositivos reales dados en las tablas de fabricantes, ya que se usan distintos materiales y características dependiendo del fabricante, aunque su comportamiento sea similar.

El dispositivo nos proporcionará una serie de datos:

$$\xi_{eff} \rightarrow \text{Amortiguamiento efectivo del dispositivo}$$

$d_{adm} \rightarrow$ Desplazamiento admisible máximo o desplazamiento de proyecto

No se nos dan todos los datos ya que algunos de ellos dependen del peso que gravita sobre el apoyo durante un evento sísmico. En los catálogos de los fabricantes encontraremos todos los datos para calcular la rigidez y el amortiguamiento efectivo, tal como hemos visto en el apartado 4.b.

$$K_{disp} = K_{eff} = \frac{V_{sism}}{R} + \frac{V_{sism} \cdot \mu}{d_{disp}} \quad ; \quad \xi_{disp} = \xi_{eff} = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{1}{\left(\frac{d_{disp}}{\mu \cdot R} + 1\right)}$$

R = es el radio de curvatura de deslizamiento del dispositivo

μ = es el coeficiente de rozamiento de la superficie de deslizamiento

V_{sism} = es la carga vertical en presencia de sismo

Tomamos V_{perm} como la carga vertical en presencia del sismo V_{sism} .

- **Calculamos la rigidez conjunta pila-apoyo**, necesaria para hallar el periodo propio de vibración de la estructura. Obtenemos la rigidez del apoyo al elegir el dispositivo.

$$K_{conj} = \frac{1}{\frac{1}{K_{pila}} + \frac{1}{K_{disp}}}$$

- **Calculamos el amortiguamiento equivalente del conjunto**, tal como hemos visto anteriormente.

$$\xi_{eq} = \frac{\xi_{pila} \cdot K_{disp} + \xi_{disp} \cdot K_{pila}}{K_{disp} + K_{pila}}$$

- **Determinamos el periodo propio:**

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K_{conj}}}$$

- **Hallamos el valor en el espectro de aceleraciones o de desplazamientos**, gracias a que conocemos el periodo propio de vibración y el amortiguamiento equivalente del conjunto.

$$\left. \begin{matrix} T \\ \xi_{eq} \end{matrix} \right\} S_a ; S_d$$

- **Calculamos el cortante y el momento a los que se ve sometida la base del pilar**, podemos utilizar tanto la ecuación de rigidez por desplazamiento como la de masa por aceleración para hallar la fuerza:

$$F = K_{conj} \cdot S_d = M \cdot S_a$$

$$M_f = F \cdot h \quad \text{siendo } h \text{ la altura del pilar}$$

- **Comprobamos que el apoyo cumple la condición de desplazamiento:**

$$F = K_{disp} \cdot d_{disp} \rightarrow d_{disp} = \frac{F}{K_{disp}}$$

Se tiene que cumplir que:

$$0,95 \cdot d_{adm} < d_{disp} \leq d_{adm}$$

Estos dispositivos suelen tener una carga admisible máxima para eventos sísmicos, que debe ser mayor que la carga que gravita sobre el dispositivo durante el terremoto, por lo que:

$$V_{adm,sism} \geq V_{sism}$$

- **Si se cumplen las condiciones anteriores, podemos aceptar el apoyo como válido, si no lo es, tenemos que buscar un nuevo apoyo comenzando de nuevo todo el proceso.**

Siguiendo los pasos anteriores y gracias a los catálogos de los fabricantes, vamos a seleccionar los dispositivos que cumplen las condiciones expuestas anteriormente.

Usamos las tablas de los fabricantes FIP y ALGA. Se ha realizado una hoja de cálculo Excel en la que se ha comprobado la validez de cada uno de los posibles dispositivos.

En la siguiente tabla tenemos el nombre del dispositivo, el amortiguamiento proporcionado, su desplazamiento de proyecto, además del esfuerzo cortante y el momento al que se ve sometido la base del pilar:

Dispositivo	Amortiguamiento disp. (%)	d _{adm} mm	F (cortante) KN	M (Momento) mKN
FIP-D 400/500 (3125)	15,1	250	172,19	1721,9

El coeficiente de rozamiento $\mu=0,025$.

Los dispositivos del fabricante FIP se nombran de la siguiente manera:

Los apoyos deslizantes en superficie curva son identificados mediante la sigla FIP o FIP-D seguido de 3 cifras. La primera representa la carga máxima vertical estática en ELU en KN/10, la segunda el desplazamiento total en milímetros, la tercera, en paréntesis, indica el radio de curvatura del elemento cóncavo en milímetros.

Los dispositivos de ALGA no especifican el coeficiente de rozamiento, por lo que tanteamos para los dispositivos su valor.

Dispositivo	Coef. μ	Amortiguamiento efectivo (%)	d_{adm} mm	F (cortante) KN	M (Momento) mKN
APS 4000/400	0,04	28	200	143,69	1436,9

Los dispositivos del fabricante ALGA se nombran de la siguiente manera:

Se identifican por las siglas APS seguido de dos cifras: la primera representa el radio de curvatura del elemento de deslizamiento en milímetros y la segunda cifra representa el desplazamiento total ($\pm 200\text{ mm} = 400\text{ mm}$).

e. Amortiguadores viscosos

Los amortiguadores viscosos tienen un comportamiento puramente no lineal, pero vamos a realizar un par de comprobaciones mediante cálculos simplificados que nos darán una idea más o menos acertada del tipo de amortiguadores a utilizar y de los esfuerzos en la estructura.

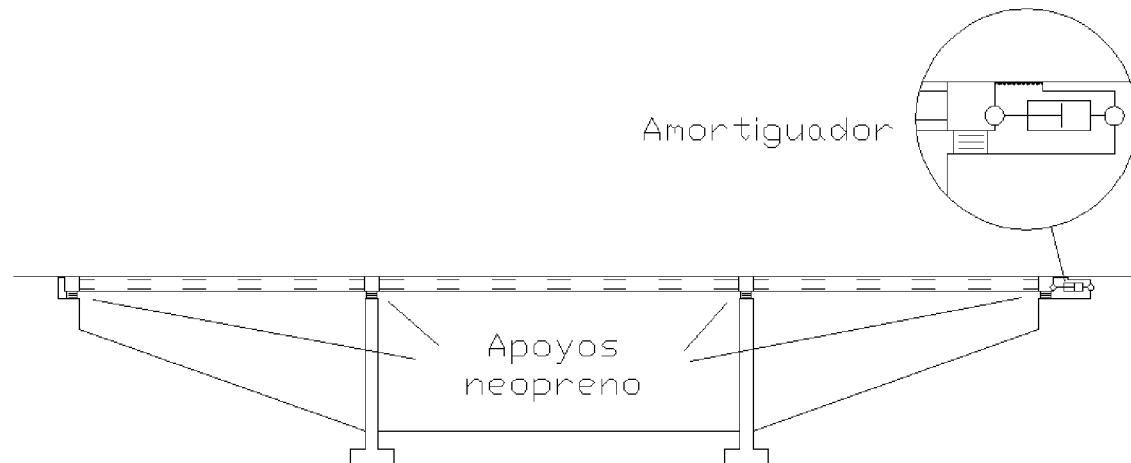
Es un punto de partida, nos sirve para realizar un predimensionamiento de los amortiguadores que posteriormente deberán ser comprobados mediante cálculos no lineales.

En primer lugar vamos a insertar un amortiguador en la estructura modelada, cuyo tablero descansará sobre apoyos de neopreno convencionales y lo compararemos con el mismo caso sin el uso de amortiguadores.

En segundo lugar, vamos a realizar una comprobación distinta a la realizada con los dispositivos sísmicos anteriores. Se supondrá un tablero que descansa sobre apoyos deslizantes horizontales y calcularemos los esfuerzos en el tablero, inicialmente colocando un anclaje que impida el libre desplazamiento del tablero y posteriormente colocando unos amortiguadores viscosos.

USO CONJUNTO DE APOYOS ELASTOMÉRICOS CONVENCIONALES Y AMORITIGUADORES VISCOSOS

Debido a la posición en la que se encuentra el amortiguador, uniendo el estribo y el tablero, suponemos para su cálculo que el tablero tiene una rigidez infinita en comparación con la rigidez de las pilas, usando para ello un modelo de tablero rígido.



Para realizar los cálculos vamos a realizar la discretización de un sistema de un grado de libertad, la masa de cada pila debe ser inferior al 20% de la masa del tablero que soporta dicha pila y la distancia entre el centro de gravedad del tablero y el centro de rigidez de los elementos sustentadores no debe superar el 5% de la longitud del tablero.

La masa concentrada del sistema la tomamos de la masa total del tablero más la masa debida a la combinación cuasipermanente de las sobrecargas más la mitad de la masa de las pilas. El pavimento y las aceras no se tienen en cuenta en este estudio, aunque en los casos reales habría que incluirlos. La masa del tablero es:

- Área de la sección maciza del tablero:

$$A_{mac} = 6,525 \text{ m}^2$$

- Área de los aligeramientos del tablero:

$$A_{ali} = 1,4137 \text{ m}^2$$

- Volumen del tablero:

$$V = 6,525 \cdot 66 - 1,4137 \cdot 62 = 343 \text{ m}^3$$

- Masa del tablero:

$$M = 343 \cdot 2500 = 857500 \text{ Kg}$$

A esta masa hay que sumarle la masa debida a la combinación cuasipermanente de las sobrecargas:

$$M_{sc} = 400 \cdot 66 \cdot 11 + 60000 = 350400 \text{ Kg}$$

$$M_{cp,sc} = \psi_2 \cdot M_{sc} = 0,2 \cdot 350400 = 70080 \text{ Kg}$$

Y la mitad de la masa de las pilas:

$$M_{pilas} = 4 \cdot \pi \frac{0,9^2}{4} \cdot 10 \cdot 2500 = 63617 \text{ Kg}$$

La masa del oscilador es igual a la masa del tablero más la masa de la combinación cuasipermanente de sobrecargas más la mitad de la masa de las pilas:

$$M = 857500 + 70080 + \frac{63617}{2} = 959388 \text{ Kg}$$

Como observamos, la masa de las pilas es inferior al 20% de la masa del tablero.

- **Sin amortiguador**

Comenzamos estudiando el caso en el que no tenemos instalado el amortiguador viscoso.

El estudio se realiza de la misma manera que en el apartado 5.b, pero en este caso tendremos dos tipos de apoyos, por un lado los apoyos sobre las pilas y por otro los apoyos sobre los estribos, de mayor tamaño, que tendrán que soportar desplazamientos mayores.

Todos y cada uno de los apoyos deben cumplir los siguientes requisitos:

$$V_{max} \leq V_{adm} \quad ; \quad d_{apoyo} \leq d_{adm}$$

Explicamos detalladamente el proceso de cálculo:

- **Dimensionamos en planta cada uno de los apoyos** de neopreno para su carga vertical.

La carga vertical de trabajo admisible es de 15 N/mm^2 . (En el ejemplo utilizaremos apoyos cilíndricos debido a la forma circular de la pila).

El área mínima de la sección del apoyo es:

$$A > \frac{V_{max}}{\sigma_{adm}} \quad ; \quad \text{Ej: } A > \frac{3238090}{15} = 215873 \text{ mm}^2$$

Normalmente los apoyos son rectangulares o circulares.

Para apoyos rectangulares:

$$A = a \cdot b \rightarrow a, b = \text{longitudes laterales del apoyo}$$

Para apoyos circulares:

$$A = \frac{\pi \cdot \varnothing^2}{4} \rightarrow \varnothing = 2 \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad ; \quad \text{Ej: } \varnothing \geq 2 \sqrt{\frac{215873}{\pi}} = 524,27 \text{ mm}$$

Dimensionamos los apoyos para diámetros múltiplos de 50 mm.

- **Elegimos la altura de los apoyos**, que estará en relación directa con la deformación admisible del apoyo. Hay múltiples alturas según fabricantes, pero tomamos unos límites razonables por estabilidad:

$$0,1 \leq \frac{t}{\varnothing} \leq 0,3 \quad t = \text{altura del apoyo}$$

En caso de eventos sísmicos los valores suelen ser cercanos a $t = 0,3 \cdot \varnothing$

Dimensionamos los apoyos para alturas múltiplos de 10 mm.

- **Hallamos la deformación tangencial admisible**, es decir, el desplazamiento admisible de cada apoyo.

$$\text{Para } 0,1 \leq \frac{t}{\varnothing} \leq 0,2 \rightarrow d_{adm} = 0,7 \cdot t$$

$$\text{Para } 0,2 \leq \frac{t}{\varnothing} \leq 0,3 \rightarrow d_{adm} = t \cdot \left(0,9 - \frac{t}{\varnothing}\right)$$

$\varnothing$ para apoyo circular o menor dimensión en planta para apoyo rectangular

- **Determinamos la rigidez de los distintos apoyos**

$$K_{apoyo} = \frac{G \cdot A}{t}$$

La norma NCSP-07 considera dos valores máximo y mínimo del módulo de elasticidad transversal:

$$G_{b,m\acute{a}x} = 1,65 \cdot G$$

$$G_{b,m\acute{i}n} = 0,9 \cdot G$$

Siendo G el módulo de elasticidad transversal convencional aparente del elastómero ($G=0,9 \text{ N/mm}^2$). La rigidez del apoyo para cargas dinámicas o rápidas viene determinada por el valor máximo, por lo que queda:

$$K_{apoyo} = \frac{G_{b,m\acute{a}x} \cdot A}{t} = \frac{1,65 \cdot G \cdot A}{t}$$

- **Calculamos la rigidez de los conjuntos pila-apoyo**, necesaria para hallar el periodo propio de vibración de la estructura:

$$K_{conj} = K_{pila-apoyo} = \frac{1}{\frac{1}{K_{pila}} + \frac{1}{K_{apoyo}}}$$

- **Calculamos la rigidez global del sistema**, tenemos que sumar las rigideces de los conjuntos pila-apoyo y de los apoyos de los estribos.

$$K_{global} = \sum K_{conj} \rightarrow \text{Ej: } K_{global} = 4 \cdot K_{pila-apoyo} + 4 \cdot K_{ap_estribo}$$

- **Determinamos el periodo propio:**

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K_{global}}}$$

- Hallamos el valor en el espectro de aceleraciones o de desplazamientos, gracias a que conocemos el periodo propio de vibración y el amortiguamiento ($\xi = 5\%$).

$$\left. \begin{matrix} T \\ \xi \end{matrix} \right\} S_a ; S_d$$

- Calculamos el esfuerzo cortante producido para toda la estructura, podemos utilizar tanto la ecuación de rigidez por desplazamiento como la de masa por aceleración para hallar la fuerza:

$$F = K_{global} \cdot S_d = M \cdot S_a$$

- Calculamos el esfuerzo cortante que llega a cada uno de los apoyos.

$$F_{pila-apoyo} = K_{pila-apoyo} \cdot S_d \quad ; \quad F_{ap_estibo} = K_{ap_estibo} \cdot S_d$$

- Calculamos los cortantes y momentos a los que se ven sometidos las bases de los pilares:

$$F_{pila-apoyo} = K_{pila-apoyo} \cdot S_d$$

$$M_f = F_{pila-apoyo} \cdot h \quad \text{siendo } h \text{ la altura del pilar}$$

- En el caso de los apoyos de los estribos se tiene que cumplir que:

$$d_{apoyo} = S_d \rightarrow d_{apoyo} < d_{adm}$$

- En el caso de los conjuntos pila-apoyo, tenemos que hallar el desplazamiento producido únicamente en el apoyo:

$$F_{pila-apoyo} = K_{apoyo} \cdot d_{apoyo} \rightarrow d_{apoyo} = \frac{F}{K_{apoyo}}$$

- Y tiene que cumplir que:

$$d_{apoyo} < d_{adm}$$

- Si las condiciones anteriores se cumplen, podemos aceptar los apoyos como válidos, si no lo son, tenemos que buscar unos nuevos apoyos comenzando de nuevo todo el proceso.

Siguiendo los pasos anteriores y teniendo en cuenta las limitaciones impuestas durante el proceso, se ha realizado una hoja de cálculo Excel en la que se han comprobado las distintas disposiciones posibles de apoyos, quedándonos con la solución que usa los apoyos de neopreno de menor tamaño, tanto en los estribos como en las pilas.

Dimensión apoyo pila ($\emptyset \times t$ mm)	Dimensión apoyo estribo ($\emptyset \times t$ mm)	F (Cortante) KN	M (Momento) mKN
700x80	950x260	333,95	3339,5

Los cortantes disminuyen al mismo tiempo que voy aumentando ambos apoyos, pero no queremos que sean muy grandes, ya que en la pila, por ejemplo, no tenemos mucho margen para crecer.

- **Con amortiguador**

El estudio se realiza de la misma manera que en el apartado anterior, pero predimensionamos un amortiguador o amortiguadores colocados en el estribo para disminuir los esfuerzos. El amortiguador introducirá un amortiguamiento viscoso equivalente en el modelo anterior.

En el apartado 4.c encontramos la energía disipada en cada ciclo dependiendo del valor del coeficiente α . Tomamos para los cálculos un coeficiente α bajo, $\alpha = 0,15$, para que reaccione con una fuerza casi constante en un amplio rango de velocidades.

La energía disipada en cada ciclo para $\alpha = 0,15$ es:

$$E_{D,i} = 3,827 \cdot F_{max} \cdot u_{max}$$

Mediante un proceso iterativo, vamos a hallar la posible combinación de amortiguadores más idónea.

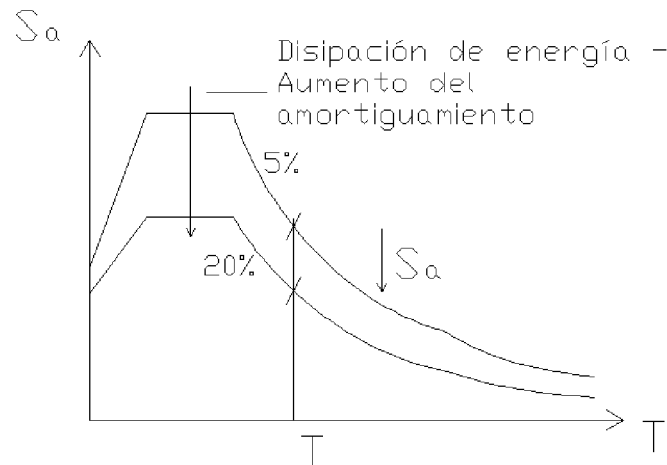
El proceso de cálculo es el siguiente:

- **Dimensionamos unos apoyos para los estribos y para las pilas**, tal como hicimos en el ejercicio anterior.
- **Hallamos la rigidez global del sistema**, que es la suma de las rigideces pila-apoyo más la de los apoyos de los estribos:
- **Vamos a introducir un valor del amortiguamiento cercano al valor que queremos obtener** (por ejemplo el 20%), debido a que no conocemos los desplazamientos, necesarios para obtener el amortiguador.
- **Determinamos el periodo propio**, que va a ser constante durante todo el proceso en caso de no cambiar de apoyos:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K_{global}}}$$

- **Hallamos el valor de la aceleración y del desplazamiento en el espectro** gracias al amortiguamiento supuesto y al periodo propio de vibración:

$$\left. \begin{array}{l} T \\ \xi_{eq} (Ej: 20\%) \end{array} \right\} S_a ; S_d$$



- Una vez tenemos el desplazamiento producido, calculamos el amortiguamiento perteneciente al dispositivo viscoso.

$$\xi_{eq} = \frac{\sum \xi_i \cdot E_{di}}{\sum E_{di}} = \frac{\xi_{amort} \cdot K_{global} \cdot S_d^2 + \xi_{estr} \cdot K_{global} \cdot S_d^2}{K_{global} \cdot S_d^2} = \xi_{amort} + \xi_{estr}$$

Teniendo en cuenta que el amortiguamiento de la estructura $\xi_{estr} = 5\%$, el amortiguamiento del dispositivo será:

$$\xi_{amort} = \xi_{eq} - \xi_{estr} \rightarrow \text{Ej: } \xi_{amort} = 0,20 - 0,05 = 0,15$$

- Con el valor del amortiguamiento hallamos el posible amortiguador:

El amortiguamiento producido por el dispositivo viscoso es:

$$\xi_{amort} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{E_{D,i}}{E_T} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{3,827 \cdot F_{max} \cdot u_{max}}{K_{global} \cdot S_d^2}$$

Como conocemos el valor del desplazamiento S_d , podemos hallar la relación $F_{max} \cdot u_{max}$ que cumple el valor supuesto del 20% de amortiguamiento equivalente.

$$F_{max} \cdot u_{max} = \frac{2\pi \cdot K_{global} \cdot S_d^2 \cdot \xi_{amort}}{3,827}$$

- Elegimos un amortiguador real, que tenga una relación ($F_{max} \cdot u_{max}$) cercana a la calculada en el apartado anterior para llegar antes a convergencia.

$$(F_{max} \cdot u_{max})_{del \text{ amortiguador}} \approx (F_{max} \cdot u_{max})_{calculada}$$

Tenemos que tener en cuenta que el máximo desplazamiento producido en el amortiguador es el mismo que se produce para todo el sistema por lo que:

$$u_{max} \approx S_d$$

- **Determinamos el amortiguamiento real del dispositivo** con la relación fuerza por desplazamiento del amortiguador elegido y el desplazamiento máximo dado por el espectro inicialmente.

$$\xi_{real_amort} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{3,827 \cdot (F_{max} \cdot u_{max})_{del\ amortiguador}}{K_{global} \cdot S_d^2}$$

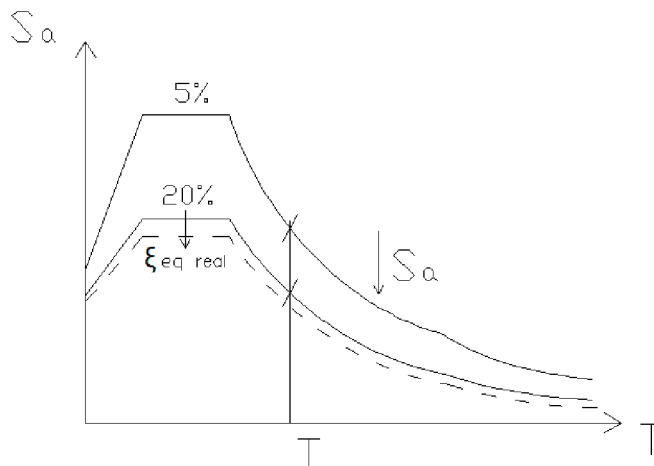
- **Hallamos el valor de la aceleración y del desplazamiento en el espectro** con el amortiguamiento real y el periodo propio de vibración:

$$\left. \begin{matrix} T \\ \xi_{eq_real} = \xi_{real_amort} + \xi_{estr} \end{matrix} \right\} S_a ; S_d$$

- **Normalmente los valores de la aceleración y el desplazamiento variarán, por lo que tendremos que volver a calcular el amortiguamiento con el último valor del desplazamiento:**

$$\xi_{real_amort} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{3,827 \cdot (F_{max} \cdot u_{max})_{del\ amortiguador}}{K_{global} \cdot S_d^2}$$

- **Y con este amortiguamiento, hallamos el nuevo valor de aceleración y del desplazamiento en el espectro**, realizando nuevas iteraciones hasta que el valor del desplazamiento máximo espectral se iguale, por lo que habremos llegado a convergencia.



- **Una vez que hemos llegado a convergencia, se tienen que cumplir todas las condiciones vistas en el apartado anterior para cada uno de los apoyos de neopreno:**

$$V_{max} \leq V_{adm} \quad ; \quad d_{apoyo} \leq d_{adm}$$

También se deberá cumplir que el desplazamiento máximo producido en el amortiguador sea el mismo que se produce para todo el sistema, por lo que:

$$u_{max} \approx S_d$$

Para el ejemplo que estamos estudiando vamos a imponer que el valor del desplazamiento producido en el amortiguador cumpla la siguiente relación para darlo por válido:

$$0,97 \cdot S_d < u_{max} < S_d$$

- Para finalizar, calcularemos el esfuerzo cortante y el momento producido en la base de los pilares de la misma manera que se realizó sin el uso de amortiguadores:

$$F = K_{global} \cdot S_d = M \cdot S_a$$

$$F_{pila-apoyo} = K_{pila-apoyo} \cdot S_d$$

$$M_f = F_{pila-apoyo} \cdot h \quad \text{siendo } h \text{ la altura del pilar}$$

Siguiendo los pasos anteriores y teniendo en cuenta las limitaciones impuestas durante el proceso, se ha realizado una hoja de cálculo Excel en la que se han comprobado las distintas disposiciones posibles de los apoyos, quedándonos como solución con la que usa los apoyos de neopreno de menor tamaño, tanto en los estribos como en las pilas. Iniciaremos el cálculo suponiendo un amortiguamiento del 20%, ya que es el amortiguamiento que deseamos obtener:

Dimensión apoyo pila ($\emptyset \times t$ mm)	Dimensión apoyo estribo ($\emptyset \times t$ mm)	Dimensión amortiguador $F_{max}(KN) \times u_{max}(mm)$	F (Cortante) KN	M (Momento) mKN
550x70	650x160	600x100 2x300x100 3x200x100 6x100x100 Etc...	182,68	1826,8

El amortiguamiento equivalente del sistema ha quedado en un 23,8%,

El hecho de colocar un amortiguador viscoso conjuntamente a los apoyos ha producido una disminución de los esfuerzos en la base de las pilas de un 45,3%, teniendo también en cuenta el ahorro debido a la gran disminución de tamaño de los neoprenos por el hecho de usar amortiguadores viscosos.

TABLERO SOBRE APOYOS DESLIZANTES HORIZONTALES

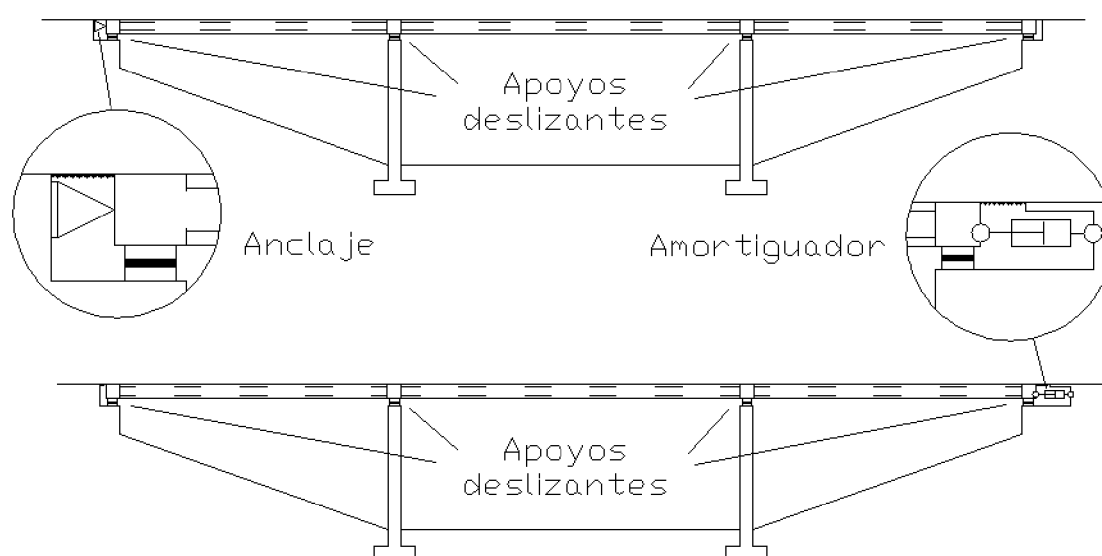
Suponemos la estructura vista anteriormente, cuyo tablero descansa sobre apoyos deslizantes en superficie plana, por lo que su contribución a las fuerzas horizontales es prácticamente despreciable, siendo su valor el de la fuerza de rozamiento. Usamos coeficientes de rozamiento situados entre el 1 el 4 %, por tanto las pilas no se verán sometidas a esfuerzos importantes debidos al sismo.

Como dijimos anteriormente, este cálculo solo es un punto de partida para comprobar posteriormente los dispositivos predimensionados con métodos no lineales.

Se realizará la comprobación de la estructura anterior, colocando un anclaje que impida el libre desplazamiento del tablero y posteriormente colocando unos amortiguadores viscosos, determinando la disminución de la fuerza inducida en el tablero en el caso de sismo.

En condiciones de servicio, como el amortiguador puede sufrir movimientos, lo ideal sería combinar el amortiguador con un dispositivo de fusible mecánico, que evitará que el amortiguador entre en funcionamiento hasta el momento en que ocurra un evento sísmico.

En el siguiente esquema se representan cada uno de los casos descritos a comparar:



Para realizar los cálculos se lleva a cabo la discretización de un sistema de un grado de libertad, siendo la rigidez axial del tablero la que nos proporcione la rigidez del sistema.

Calculamos la rigidez del tablero suponiendo que este está aligerado en toda su longitud, por lo que la rigidez axial del tablero es:

$$K = \frac{EA}{L} = \frac{3 \cdot 10^{10} \cdot (6,525 - 1,4137)}{66} = 2323,32 \cdot 10^6 \text{ N/m}$$

La masa concentrada del sistema la tomamos de la masa total del tablero más la masa debida a la combinación cuasipermanente de las sobrecargas. El pavimento y las aceras no se tienen en cuenta en este estudio, aunque en los casos reales habría que incluirlos.

$$M = 857500 + 70080 = 927580 \text{ Kg}$$

- **Con anclaje**

Tomando los datos anteriores, dimensionaremos la fuerza ejercida en el posible anclaje debida a un movimiento sísmico.

- **Con la rigidez y la masa hallamos el periodo de vibración del tablero.**

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K}} = 2\pi \sqrt{\frac{927580}{2323,32 \cdot 10^6}} = 0,1255 \text{ s}$$

- **Tomamos un amortiguamiento del 5% para el espectro**, correspondiente al usado en puentes de hormigón armado.
- **Hallamos el valor en el espectro de aceleraciones y de desplazamientos**, gracias a que conocemos el periodo propio de vibración y el amortiguamiento.

$$S_a = 6,987 \frac{m}{s^2} \quad ; \quad S_d = 0,002788 \text{ m}$$

- **Calculamos el esfuerzo axial al que se ve sometido el anclaje y el tablero** debido al movimiento sísmico. Podemos utilizar tanto la ecuación de rigidez por desplazamiento como la de masa por aceleración para hallar la fuerza, esta será una fuerza tanto de compresión como de tracción:

$$F = K \cdot S_d = M \cdot S_a = 927580 \cdot 6,987 = 6481000 \text{ N} = 6481 \text{ KN}$$

- **Con amortiguador**

Predimensionamos un amortiguador colocado en sustitución del anclaje para disminuir las fuerzas inducidas en el tablero. El amortiguador introducirá un amortiguamiento viscoso equivalente en el modelo anterior.

En el apartado 4.c encontramos la energía disipada en cada ciclo dependiendo del valor del coeficiente α . Tomamos para los cálculos un coeficiente α bajo, $\alpha = 0,15$, para que reaccione con una fuerza casi constante en un amplio rango de velocidades.

La energía disipada en cada ciclo para $\alpha = 0,15$ es:

$$E_{D,i} = 3,827 \cdot F_{max} \cdot u_{max}$$

Mediante un proceso iterativo, vamos a hallar la posible combinación de amortiguadores más idónea.

El proceso de cálculo es el siguiente:

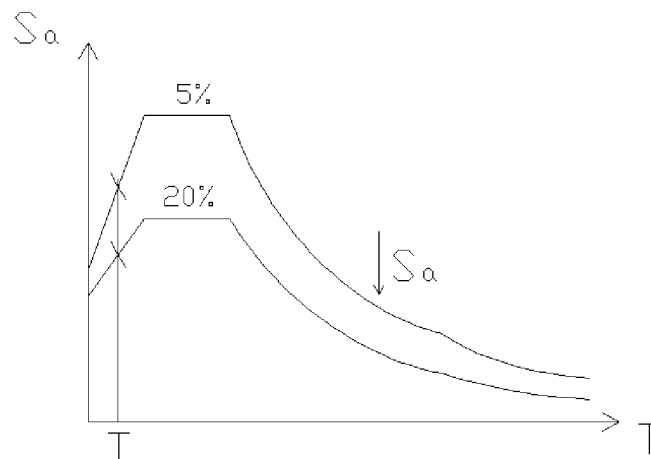
- **Vamos a introducir un valor del amortiguamiento cercano al valor que queremos obtener** (por ejemplo el 20%), necesario para obtener el amortiguador.
- **Determinamos el periodo propio**, que va a ser constante durante todo el proceso:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K}} \rightarrow \text{Ej: } T = 2\pi \sqrt{\frac{927580}{2323,32 \cdot 10^6}} = 0,1255 \text{ s}$$

- **Hallamos el valor de la aceleración y del desplazamiento en el espectro** gracias al amortiguamiento supuesto y al periodo propio de vibración:

$$\left. \begin{array}{l} T \\ \xi_{eq} (\text{Ej: } 20\%) \end{array} \right\} S_a ; S_d$$

$$\text{Ej: } S_a = 4,307 \frac{m}{s^2} ; S_d = 0,00172 \text{ m}$$



- **Una vez tenemos el desplazamiento producido, calculamos el amortiguamiento perteneciente al dispositivo viscoso.**

$$\xi_{eq} = \frac{\sum \xi_i \cdot E_{di}}{\sum E_{di}} = \frac{\xi_{amort} \cdot K \cdot S_d^2 + \xi_{estr} \cdot K \cdot S_d^2}{K \cdot S_d^2} = \xi_{amort} + \xi_{estr}$$

Teniendo en cuenta que el amortiguamiento de la estructura $\xi_{estr} = 5\%$, el amortiguamiento del dispositivo será:

$$\xi_{amort} = \xi_{eq} - \xi_{estr} \rightarrow \text{Ej: } \xi_{amort} = 0,20 - 0,05 = 0,15$$

- **Con el valor del amortiguamiento hallamos el posible amortiguador:**

El amortiguamiento producido por el dispositivo viscoso es:

$$\xi_{amort} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{E_{D,i}}{E_T} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{3,827 \cdot F_{max} \cdot u_{max}}{K \cdot S_d^2}$$

Como conocemos el valor del desplazamiento S_d , podemos hallar la relación $F_{max} \cdot u_{max}$ que cumple el valor supuesto del 20% de amortiguamiento equivalente.

$$F_{max} \cdot u_{max} = \frac{2\pi \cdot K \cdot S_d^2 \cdot \xi_{amort}}{3,827}$$

$$\text{Ej: } F_{max} \cdot u_{max} = \frac{2\pi \cdot 2323,32 \cdot 10^6 \cdot 0,00172^2 \cdot 0,15}{3,827} = 1692,7 \text{ N} \cdot \text{m}$$

- **Elegimos un amortiguador real, que tenga una relación ($F_{max} \cdot u_{max}$) cercana a la calculada en el apartado anterior para llegar antes a convergencia.**

$$(F_{max} \cdot u_{max})_{del \text{ amortiguador}} \approx (F_{max} \cdot u_{max})_{calculada}$$

$$\text{Ej: } 40 \text{ KN} \times 40 \text{ mm} \text{ ó } 2 \times 20 \text{ KN} \times 40 \text{ mm} \text{ etc ...}$$

- **Determinamos el amortiguamiento real del dispositivo con la relación fuerza por desplazamiento del amortiguador elegido y el desplazamiento máximo dado por el espectro inicialmente.**

$$\xi_{real_amort} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{3,827 \cdot (F_{max} \cdot u_{max})_{del \text{ amortiguador}}}{K \cdot S_d^2}$$

$$\text{Ej: } \xi_{real_amort} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{3,827 \cdot 1600}{2323,32 \cdot 10^6 \cdot 0,00172^2} = 0,142$$

- **Hallamos el valor de la aceleración y del desplazamiento en el espectro con el amortiguamiento real y el periodo propio de vibración:**

$$\left. \begin{matrix} T \\ \xi_{eq_real} = \xi_{real_amort} + \xi_{estr} \end{matrix} \right\} S_a ; S_d$$

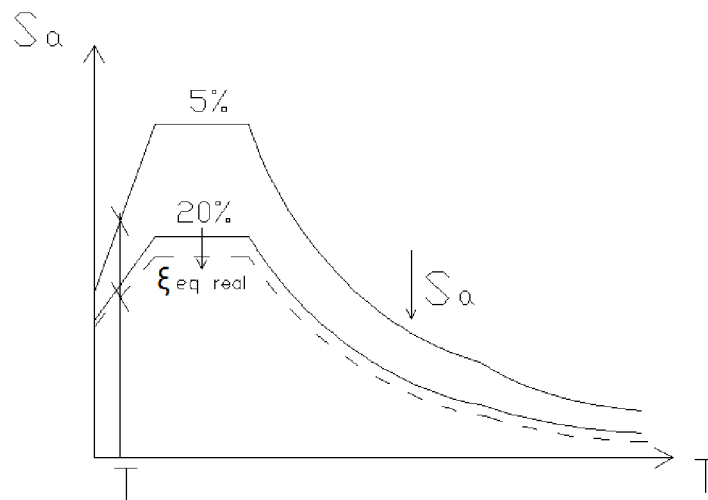
$$\text{Ej: } S_a = 4,367 \frac{m}{s^2} \quad ; \quad S_d = 0,00174 \text{ m}$$

- Normalmente los valores de la aceleración y el desplazamiento variarán, por lo que tendremos que volver a calcular el amortiguamiento con el último valor del desplazamiento:

$$\xi_{real_amort} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{3,827 \cdot (F_{max} \cdot u_{max})_{del \text{ amortiguador}}}{K \cdot S_d^2}$$

$$Ej: \xi_{real_amort} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{3,827 \cdot 1600}{2323,32 \cdot 10^6 \cdot 0,00174^2} = 0,138$$

- Y con este amortiguamiento, hallamos el nuevo valor de aceleración y del desplazamiento en el espectro, realizando nuevas iteraciones hasta que el valor del desplazamiento máximo espectral se iguale, por lo que habremos llegado a convergencia.



- Una vez hemos llegado a convergencia, calculamos el esfuerzo axial al que se ve sometido el tablero:

$$F = K \cdot S_d = M \cdot S_a$$

$$Ej: F = 927580 \cdot 4,406 = 4087000 \text{ N} = 4087 \text{ KN}$$

El amortiguamiento equivalente del sistema se ha quedado en un 18,7%.

En el ejemplo podríamos haber optado por un sistema algo mayor, por lo que hubiéramos obtenido mayor disminución de esfuerzos. En el ejemplo la disminución de esfuerzos ha sido de un 36,9%.

Hay que comprobar los dispositivos predimensionados mediante métodos no lineales.

6. CONCLUSIONES

El uso de dispositivos antisísmicos se está extendiendo rápidamente, y no es de extrañar, ya que los beneficios obtenidos con estos sistemas son numerosos.

Los dispositivos antisísmicos de apoyo, como los apoyos elastoméricos con núcleo de plomo y dispositivos pendulares, tienen enormes ventajas, como su instalación, ya que se colocarían en sustitución de los apoyos de neopreno convencionales de la misma manera, pero consiguiendo enormes reducciones en los esfuerzos producidos en la base de pilar. El hecho de usar dispositivos antisísmicos no complicará la habitual ejecución del puente.

El ahorro experimentado por el uso de estos dispositivos antisísmicos en lugar del apoyo convencional de neopreno, en el ejemplo expuesto, tiene los siguientes valores:

Dispositivo de apoyo	Fuerza cortante en la pila	Disminución de los esfuerzos
Uso de apoyo de neopreno convencional	452 KN	Referencia
Uso de apoyo elastomérico con núcleo de plomo	262,48 KN – 190,41 KN	41,9 % - 57,9 %
Dispositivo pendular	172,19 KN – 143,69 KN	61,9 % - 68,2 %

(Usamos de referencia el apoyo de $\phi = 750$ mm y $t = 150$ mm, pues sería el más adecuado por su relación entre la fuerza cortante producida y su tamaño)

Como vemos, el ahorro producido es muy elevado. Destaca sobre todo el dispositivo pendular, que además nos asegura el recentrado automático de la estructura.

Con estos dispositivos no solo evitaremos la plastificación de los elementos estructurales, sino que lograremos una reducción importante de armadura, llegando a ser en muchos casos más baratas las estructuras aisladas con dispositivos antisísmicos que las que no lo están.

En el caso de usar amortiguadores viscosos, conseguiremos una disminución tanto de los desplazamientos como de las aceleraciones por la disipación de la energía en el dispositivo. Con estos elementos obtendremos una amortiguación adicional.

Como vemos en el ejemplo del paso superior, pequeños amortiguadores consiguen grandes disminuciones de energía. En una estructura como la estudiada, para un sismo de intensidad media-alta, la aplicación de un amortiguador de pequeñas dimensiones en lugar de un anclaje consigue un ahorro del 40% en los esfuerzos introducidos en el tablero.

También en el ejemplo en estudio observamos los problemas para la inserción de apoyos de neopreno convencional, cumpliendo solo los de mayor tamaño. Podemos usar los amortiguadores conjuntamente con los apoyos para reducir las acciones, siendo éstas importantes (del 45% en el ejemplo), logrando además una disminución del tamaño de los apoyos utilizados.

En este estudio hemos necesitado amortiguadores de pequeño tamaño para conseguir ahorros importantes, lo que nos lleva a pensar que en estructuras mayores sometidas a sismos importantes, solo los amortiguadores con una relación fuerza por desplazamiento elevado pueden conseguir disminuciones importantes de la acción sísmica.

Todos los dispositivos estudiados son sistemas de control pasivos, que apenas tienen mantenimiento, aunque se suelen realizar inspecciones visuales periódicas para comprobar el estado del dispositivo.

Podemos concluir, desde el punto de vista funcional del puente, que es primordial eliminar la incertidumbre del 10 o 20% de posibilidades (según la importancia) de que se produzcan daños en la estructura. Lo último que deseamos después del acontecimiento de un terremoto es que las estructuras de toda una ciudad o zona resulten dañadas, impidiendo la vuelta a la normalidad de sus habitantes.

BIBLIOGRAFÍA

- Eurocode 8 – Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic action and rules for buildings. Diciembre 2004.
- Eurocode 8 – Design of structures for earthquake resistance – Part 2: Bridges. Noviembre 2005.
- Norma de construcción sismorresistente (NCSP-07). Ministerio de Fomento. 2008.
- Ray W. Clough y Joseph Penzien. “Dynamics of structures”. Tercera Edición. 1995.
- Raúl Marcelo Avilés Salazar. Tesis “Dispositivos para el control de vibraciones”. Universidad Austral de Chile. 2001.
- Jaime A. Castillo Pérez y Carlos Jiménez Ruiz. “Algunas representaciones simples de la función hipergeométrica generalizada”. 2006.
- M. Dolce, D. Cardone y G. Palermo. “Design procedures and seismic performances of isolation system for bridges”.
- Hugo Corres Pieretti y María Fernanda Defant Erimbaue. “Proyecto conceptual de puentes en zonas sísmicas”. Documento.
- Francesco Salvatore Onorio. “Tipologie di dispositivi e sistema di isolamento”. Documento.
- Jorge Rendón. “El aislamiento sísmico de estructuras”. Presentación.
- Catálogos del fabricante ALGA:
 - Algasism HDRB/LRB – High damping rubber bearings/Lead rubber bearings.
 - Algasism APS – Isolatori a pendolo scorrevole.
 - Algasism FD – Ammortizzatori viscosi fluidodinamici.
- Catálogos del fabricante FIP Industriale:
 - Dispositivi antisismici
 - S03 - Isolatori elastomerici con nucleo in piombo – Serie LRB.
 - Isolation devices – LRB series.
 - Isolatori a scorrimento a superficie curva – Serie FIP/FIP-D.
 - S04 – Isolatori a scorrimento a superficie curva.
 - Viscous dämpers OP – OTP Series.
- Catálogos del fabricante MAURER Söhne:
 - MAURER Seismic Protection
 - MAURER Seismic Isolation Systems with Lead Rubber Bearings (LRB).
- Catálogos del fabricante JARRET STRUCTURES:
 - Viscous Dampers

- Shock Transmission Units

- Maria Gabriella Castellano, Samuele Infanti y Gian Paolo Colatto. "The experience of FIP Industriale in the retrofit of bridges through seismic isolation and energy dissipation". Documento.
- FIP Industriale. "Protezione sismica delle strutture per mezzo di sistema di isolamento e dissipazione". Seminario 20 de Junio de 2006.
- Christian Braun. "The sliding isolation pendulum – an improved recentring bridge bearing". Maurer Söhne. Documento.
- Taylor devices inc. "Sistema de protección sísmica". Documento.
- Nota técnica sobre aparatos de apoyo para puentes de carretera. Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente. 1995.
- Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera (IAP-98). Ministerio de Fomento. 1998.
- Borrador del documento ACHE. Grupo de Trabajo Comisión 1. "Estructuras en zonas sísmicas". Coordinador: José Romo Martín.
- Apuntes de la asignatura "Análisis dinámico de estructuras". Pablo de la Fuente Martín.

ANEXO:

CATÁLOGOS DE FABRICANTES

ALGA

Apoyos elastoméricos con núcleo de plomo

Legenda | Legend

LRS

LRS $\xi_r = 10\%$ - $G = 0,4$ MPa

LRN

LRN $\xi_r = 4\%$ - $G = 0,9$ MPa

Dati tecnici | Technical Data

V_{max} Carico verticale massimo allo SLU con spostamento nullo

Max vertical load at ULS (Ultimate Limit State) with zero displacement

V_{sism} Carico verticale in condizione sismica

Vertical load under seismic conditions

K_r Rigidezza orizzontale (contributo elastomero)

Horizontal stiffness (elastomer contribution)

K_{lead} Rigidezza orizz. (contr. nucleo in piombo)

Horizontal stiffness (lead core contribution)

F Carico di snervamento del nucleo

Yield point load for lead core

K_{eff} Rigidezza orizzontale efficace

Effective horizontal stiffness

S_{max} Spostamento di progetto | Design displacement

ξ_r Smorzamento viscoso della gomma

Viscous damping of the rubber

β_{eff} Smorzamento efficace | Effective damping

Dati geometrici | Geometrical Data

t_e Spessore elastomero

Thickness of the elastomer

H Altezza totale isolatore

Overall height of the isolator

D Diametro elastomero

Diameter of the elastomer

B Dimensione d'ingombro dell'isolatore

(nelle due direzioni)

Overall dimensions (space requirement)

of the isolator (in two directions)

Z Interasse degli ancoraggi (nelle due direzioni)

Distance between centers of anchorages

(in two directions)

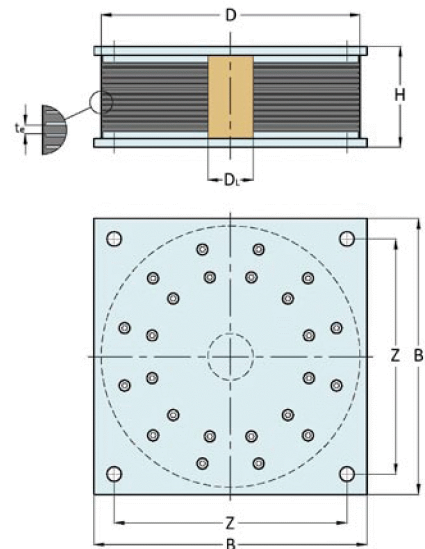
$\beta_{eff} = 28\%$

per tutti gli isolatori

for all isolators

$B = D + 50$

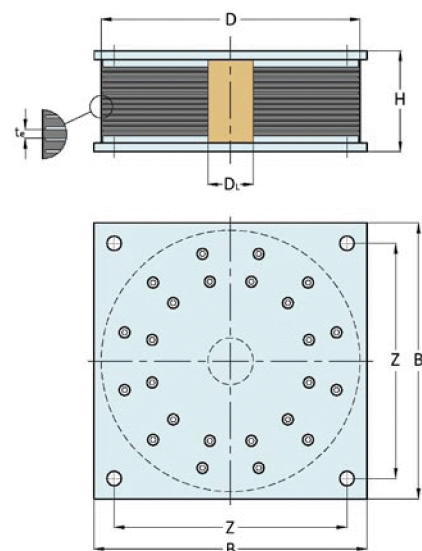
$Z = 0,75 \times B$



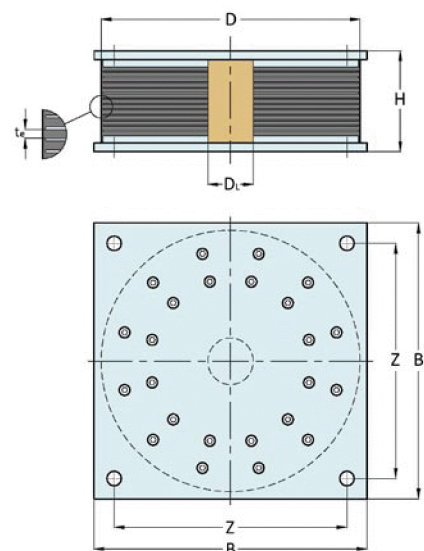
LRS	V_{max} [kN]	V_{sism} [kN]	K_r [kN/mm]	K_{lead} [kN/mm]	F_y [kN]	K_{eff} [kN/mm]	LRN	V_{max} [kN]	V_{sism} [kN]	K_r [kN/mm]	K_{lead} [kN/mm]	F_y [kN]	K_{eff} [kN/mm]	H [mm]	t_e [mm]	S_{max} [mm]
Diametro elastomero / Elastomer diameter D = 300																
LRS300X48	750	650	0,57	6,43	26	0,81	LRN300X48	1450	1250	1,18	21,27	83	1,96	146	48	100
LRS300X54	800	550	0,51	5,72	26	0,72	LRN300X54	1550	1050	1,06	17,06	75	1,70	156	54	110
LRS300X60	800	450	0,46	4,25	22	0,62	LRN300X60	1600	900	0,95	15,36	75	1,54	166	60	120
LRS300X66	700	400	0,41	4,68	26	0,58	LRN300X66	1350	750	0,86	15,47	83	1,42	176	66	140
LRS300X72	650	350	0,38	4,29	26	0,54	LRN300X72	1250	650	0,79	14,18	83	1,31	175	72	150
LRS300X78	600	300	0,35	3,96	26	0,50	LRN300X78	1150	550	0,73	11,81	75	1,18	184	78	160
LRS300X84	550	250	0,33	3,68	26	0,47	LRN300X84	1050	500	0,68	10,97	75	1,10	193	84	170
LRS300X90	500	200	0,31	2,84	22	0,41	LRN300X90	950	450	0,64	10,24	75	1,03	202	90	180
LRS300X96	450	0	0,28	3,22	26	0,40	LRN300X96	850	350	0,59	10,64	83	0,98	211	96	200
Diametro elastomero / Elastomer diameter D = 350																
LRS350X56	1050	900	0,66	7,70	36	0,94	LRN350X56	2000	1700	1,38	24,11	110	2,24	154	56	120
LRS350X63	1100	750	0,59	5,83	31	0,81	LRN350X63	2100	1450	1,23	21,43	110	2,03	165	63	130
LRS350X70	1150	650	0,53	5,25	31	0,74	LRN350X70	2100	1250	1,10	19,29	110	1,85	176	70	140
LRS350X77	1000	550	0,48	5,60	36	0,69	LRN350X77	1900	1050	1,00	17,54	110	1,65	187	77	160
LRS350X84	850	450	0,44	4,38	31	0,61	LRN350X84	1750	900	0,92	16,07	110	1,53	198	84	170
LRS350X91	800	400	0,41	4,74	36	0,58	LRN350X91	1550	800	0,85	14,84	110	1,40	197	91	190
LRS350X98	750	350	0,38	3,75	31	0,52	LRN350X98	1450	700	0,79	13,78	110	1,31	207	98	200
LRS350X105	700	300	0,36	3,50	31	0,49	LRN350X105	1350	600	0,74	12,86	110	1,23	217	105	210
LRS350X112	650	0	0,33	3,28	31	0,46	LRN350X112	1200	500	0,69	12,06	110	1,14	227	112	230
Diametro elastomero / Elastomer diameter D = 400																
LRS400X48	1250	1250	1,02	10,42	42	1,40	LRN400X48	2350	2350	2,11	35,95	141	3,43	165	138	100
LRS400X56	1300	1250	0,87	10,26	48	1,23	LRN400X56	2500	2500	1,79	33,23	151	2,98	181	150	120
LRS400X64	1400	1250	0,76	7,82	42	1,06	LRN400X64	2700	2350	1,58	26,96	141	2,60	203	169	130
LRS400X72	1450	1000	0,68	6,95	42	0,93	LRN400X72	2800	1950	1,40	23,97	141	2,29	220	182	150
LRS400X80	1500	900	0,61	6,25	42	0,85	LRN400X80	2850	1700	1,26	21,57	141	2,09	245	195	160
LRS400X88	1350	750	0,55	5,69	42	0,77	LRN400X88	2600	1450	1,15	19,61	141	1,89	263	208	180
LRS400X96	1200	650	0,51	5,21	42	0,70	LRN400X96	2300	1200	1,05	17,97	141	1,72	281	210	200
LRS400X104	1100	550	0,47	4,81	42	0,65	LRN400X104	2100	1100	0,97	16,59	141	1,60	288	222	210
LRS400X112	1000	450	0,44	4,47	42	0,60	LRN400X112	1950	900	0,90	15,41	141	1,48	305	234	230
LRS400X120	950	400	0,41	4,17	42	0,57	LRN400X120	1800	800	0,84	14,38	141	1,40	309	246	240
Diametro elastomero / Elastomer diameter D = 450																
LRS450X48	1450	1450	1,28	13,61	55	1,79	LRN450X48	2750	2750	2,65	47,86	187	4,42	138	48	100
LRS450X56	1650	1650	1,10	13,17	61	1,57	LRN450X56	3100	3100	2,27	41,02	187	3,74	150	56	120
LRS450X64	1800	1800	0,96	10,21	55	1,35	LRN450X64	3500	3500	2,00	33,54	175	3,27	169	64	130
LRS450X72	1900	1900	0,86	9,08	55	1,19	LRN450X72	3600	3350	1,77	31,91	187	2,95	182	72	150
LRS450X80	2000	1450	0,77	8,17	55	1,08	LRN450X80	3850	2950	1,60	26,83	175	2,64	195	80	160
LRS450X88	2050	1300	0,70	7,43	55	0,98	LRN450X88	3950	2550	1,46	24,39	175	2,38	218	88	180
LRS450X96	2000	1150	0,64	6,81	55	0,89	LRN450X96	3800	2150	1,33	23,93	187	2,21	221	96	200
LRS450X104	1850	1000	0,59	6,28	55	0,83	LRN450X104	3550	1950	1,23	20,64	175	2,02	234	104	210
LRS450X112	1700	850	0,55	5,83	55	0,77	LRN450X112	3250	1700	1,15	19,17	175	1,86	247	112	230
LRS450X120	1550	800	0,51	5,45	55	0,72	LRN450X120	3000	1500	1,07	17,89	175	1,76	260	120	240
LRS450X128	1450	700	0,48	5,11	55	0,67	LRN450X128	2750	1300	1,00	16,77	175	1,64	258	128	260
LRS450X136	1300	0	0,45	4,80	55	0,63	LRN450X136	2600	1150	0,95	14,71	164	1,50	270	136	280

Legenda | Legend**LRS**LRS $\xi_r = 10\%$ - $G = 0,4 \text{ MPa}$ **LRN**LRN $\xi_r = 4\%$ - $G = 0,9 \text{ MPa}$ **Dati tecnici | Technical Data****V_{max}** Carico verticale massimo allo SLU con spostamento nullo*Max vertical load at ULS (Ultimate Limit State) with zero displacement***V_{sis}** Carico verticale in condizione sismica**K_r** Rigidezza orizzontale (contributo elastomero)**K_{lead}** Rigidezza orizz. (contr. nucleo in piombo)**F_y** Carico di snervamento del nucleo**K_{eff}** Rigidezza orizzontale efficace**S_{max}** Spostamento di progetto | *Design displacement* ξ_r Smorzamento viscoso della gomma*Viscous damping of the rubber* β_{eff} Smorzamento efficace | *Effective damping***Dati geometrici | Geometrical Data****te** Spessore elastomero**H** Altezza totale isolatore**D** Diametro elastomero**B** Dimensione d'ingombro dell'isolatore*(nelle due direzioni)***Z** Interasse degli ancoraggi (nelle due direzioni)*(in two directions)* $\beta_{eff} = 28\%$

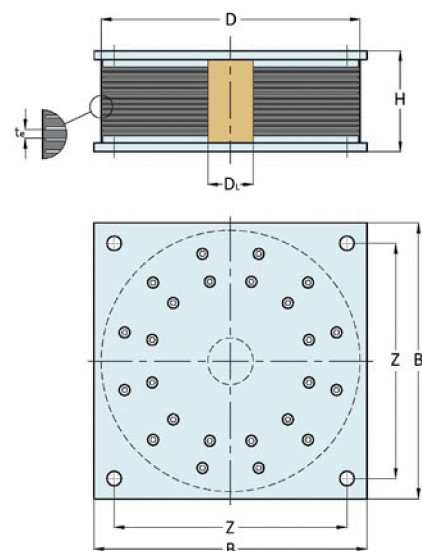
per tutti gli isolatori

B = D + 50**Z = 0,75 x B**

LRS	V _{max} [kN]	V _{sis} [kN]	K _r [kN/mm]	K _{lead} [kN/mm]	F _y [kN]	K _{eff} [kN/mm]	LRN	V _{max} [kN]	V _{sis} [kN]	K _r [kN/mm]	K _{lead} [kN/mm]	F _y [kN]	K _{eff} [kN/mm]	H [mm]	te [mm]	S _{max} [mm]
Diametro elastomero / Elastomer diameter D = 500																
LRS500X50	1700	1700	1,52	16,54	69	2,16	LRN500X50	3350	3350	3,17	52,28	213	5,18	160	50	100
LRS500X60	1950	1950	1,27	13,78	69	1,80	LRN500X60	3800	3500	2,64	43,56	213	4,32	175	60	120
LRS500X70	2150	2150	1,09	11,81	69	1,54	LRN500X70	4150	4150	2,27	37,34	213	3,70	196	70	140
LRS500X80	2250	2000	0,95	10,34	69	1,35	LRN500X80	4350	3850	1,98	32,67	213	3,24	212	80	160
LRS500X90	2350	1650	0,84	9,19	69	1,20	LRN500X90	4500	3250	1,76	29,04	213	2,88	228	90	180
LRS500X100	2400	1400	0,76	8,27	69	1,08	LRN500X100	4600	2750	1,59	26,14	213	2,59	244	100	200
LRS500X110	2150	1200	0,69	7,52	69	0,98	LRN500X110	4200	2350	1,44	23,76	213	2,36	260	110	220
LRS500X120	1950	1050	0,63	6,89	69	0,90	LRN500X120	3800	2050	1,32	21,78	213	2,16	276	120	240
LRS500X130	1800	900	0,58	6,36	69	0,83	LRN500X130	3450	1750	1,22	20,11	213	1,99	280	130	260
LRS500X140	1600	800	0,54	5,91	69	0,77	LRN500X140	3150	1550	1,13	18,67	213	1,85	295	140	280
LRS500X150	1500	700	0,51	5,51	69	0,72	LRN500X150	2900	1350	1,06	17,43	213	1,73	310	150	300
LRS500X160	1350	600	0,47	5,17	69	0,67	LRN500X160	2650	1200	0,99	16,34	213	1,62	310	160	320
LRS500X170	1250	500	0,45	4,86	69	0,63	LRN500X170	2450	1050	0,93	15,38	213	1,52	324	170	340
Diametro elastomero / Elastomer diameter D = 550																
LRS550X55	2100	2100	1,67	18,56	86	2,38	LRN550X55	3750	3750	3,37	74,26	328	6,23	165	55	110
LRS550X66	2350	2350	1,39	15,47	86	1,95	LRN550X66	4450	4450	2,87	52,95	283	4,79	181	66	140
LRS550X77	2600	2600	1,19	13,26	86	1,68	LRN550X77	4950	4950	2,48	42,96	269	4,07	203	77	160
LRS550X88	2700	2400	1,04	11,60	86	1,48	LRN550X88	5200	4600	2,17	37,59	269	3,58	220	88	180
LRS550X99	2800	2050	0,93	10,31	86	1,32	LRN550X99	5400	3900	1,93	33,42	269	3,20	245	99	200
LRS550X110	2900	1750	0,84	9,28	86	1,19	LRN550X110	5550	3350	1,74	30,07	269	2,89	263	110	220
LRS550X121	2650	1400	0,76	8,44	86	1,07	LRN550X121	5050	2800	1,58	27,34	269	2,60	281	121	250
LRS550X132	2400	1250	0,70	7,73	86	0,99	LRN550X132	4550	2450	1,45	25,06	269	2,39	288	132	270
LRS550X143	2150	1100	0,64	7,14	86	0,91	LRN550X143	4150	2150	1,34	23,13	269	2,21	305	143	290
LRS550X154	2000	950	0,60	6,63	86	0,85	LRN550X154	3800	1850	1,24	21,48	269	2,06	309	154	310
LRS550X165	1800	850	0,56	6,19	86	0,79	LRN550X165	3500	1650	1,16	20,05	269	1,93	325	165	330
Diametro elastomero / Elastomer diameter D = 600																
LRS600X60	2450	2450	1,83	18,76	95	2,55	LRN600X60	4800	4800	3,79	64,71	316	6,28	170	60	120
LRS600X72	2850	2850	1,52	17,16	103	2,15	LRN600X72	5450	5450	3,16	53,92	316	5,15	192	72	150
LRS600X84	3100	3100	1,30	14,71	103	1,86	LRN600X84	5950	5950	2,71	46,22	316	4,47	216	84	170
LRS600X96	3250	2850	1,14	12,87	103	1,61	LRN600X96	6250	5500	2,37	40,44	316	3,86	235	96	200
LRS600X108	3350	2450	1,01	11,44	103	1,44	LRN600X108	6500	4700	2,11	35,95	316	3,46	254	108	220
LRS600X120	3500	2100	0,91	9,38	95	1,27	LRN600X120	6650	4000	1,90	32,35	316	3,14	282	120	240
LRS600X132	3150	1750	0,83	9,36	103	1,18	LRN600X132	6100	3400	1,72	29,41	316	2,83	292	132	270
LRS600X144	2900	1550	0,76	7,82	95	1,06	LRN600X144	5500	2950	1,58	26,96	316	2,61	311	144	290
LRS600X156	2600	1300	0,70	7,92	103	1,00	LRN600X156	5000	2550	1,46	24,89	316	2,39	318	156	320
LRS600X168	2350	1150	0,65	7,35	103	0,93	LRN600X168	4550	2250	1,35	23,11	316	2,23	336	168	340
LRS600X180	2200	1050	0,61	6,25	95	0,85	LRN600X180	4200	2000	1,26	21,57	316	2,09	340	180	360
LRS600X192	2000	850	0,57	6,43	103	0,81	LRN600X192	3850	1700	1,19	20,22	316	1,95	357	192	390
LRS600X204	1850	800	0,54	5,52	95	0,75	LRN600X204	3600	1500	1,12	19,03	316	1,84	374	204	410
Diametro elastomero / Elastomer diameter D = 650																
LRS650X65	2950	2950	1,98	20,77	114	2,78	LRN650X65	5650	5650	4,12	69,27	367	6,78	179	65	130
LRS650X78	3350	3350	1,64	18,85	123	2,35	LRN650X78	6450	6450	3,43	57,73	367	5,59	198	78	160

Legenda | Legend**LRS**LRS $\xi_r = 10\%$ - $G = 0,4$ MPa**LRN**LRN $\xi_r = 4\%$ - $G = 0,9$ MPa**Dati tecnici | Technical Data****V_{max}** Carico verticale massimo allo SLU con spostamento nullo*Max vertical load at ULS (Ultimate Limit State) with zero displacement***V_{sis}** Carico verticale in condizione sismica**K_r** Rigidezza orizzontale (contributo elastomero)*Horizontal stiffness (elastomer contribution)***K_{lead}** Rigidezza orizz. (contr. nucleo in piombo)*Horizontal stiffness (lead core contribution)***F_y** Carico di snervamento del nucleo*Yield point load for lead core***K_{eff}** Rigidezza orizzontale efficace*Effective horizontal stiffness***S_{max}** Spostamento di progetto | *Design displacement* ξ_r Smorzamento viscoso della gomma*Viscous damping of the rubber* β_{eff} Smorzamento efficace | *Effective damping***Dati geometrici | Geometrical Data****te** Spessore elastomero*Thickness of the elastomer***H** Altezza totale isolatore*Overall height of the isolator***D** Diametro elastomero*Diameter of the elastomer***B** Dimensione d'ingombro dell'isolatore (nelle due direzioni)*Overall dimensions (space requirement) of the isolator (in two directions)***Z** Interasse degli ancoraggi (nelle due direzioni)*Distance between centers of anchorages (in two directions)* $\beta_{eff} = 28\%$
per tutti gli isolatori*for all isolators***B = D + 50****Z = 0,75 x B**

LRS	V _{max}	V _{sis}	K _r	K _{lead}	F _y	K _{eff}	LRN	V _{max}	V _{sis}	K _r	K _{lead}	F _y	K _{eff}	H	te	S _{max}
	[kN]	[kN]	[kN/mm]	[kN/mm]	[kN]	[kN/mm]		[kN]	[kN]	[kN/mm]	[kN/mm]	[%]	[kN/mm]	[mm]	[mm]	[mm]
Diametro elastomero / Elastomer diameter D = 650																
LRS650X91	3600	3600	1,41	16,16	123	2,00	LRN650X91	6900	6900	2,92	51,86	384	4,83	223	91	190
LRS650X104	3850	3450	1,24	12,98	114	1,73	LRN650X104	7400	6600	2,57	43,30	367	4,22	250	104	210
LRS650X117	3950	2850	1,10	12,57	123	1,57	LRN650X117	7550	5450	2,27	40,34	384	3,79	271	117	240
LRS650X130	4100	2500	0,99	10,39	114	1,39	LRN650X130	7800	4700	2,05	36,31	384	3,44	292	130	260
LRS650X143	3750	2100	0,90	9,44	114	1,26	LRN650X143	7150	4000	1,86	33,00	384	3,11	313	143	290
LRS650X156	3350	1800	0,82	9,42	123	1,18	LRN650X156	6450	3450	1,70	30,25	384	2,84	323	156	320
LRS650X169	3100	1500	0,76	7,99	114	1,07	LRN650X169	5950	3050	1,58	26,64	367	2,60	343	169	340
LRS650X182	2800	1350	0,71	7,42	114	0,99	LRN650X182	5350	2600	1,46	25,93	384	2,44	350	182	370
LRS650X195	2600	1200	0,66	6,92	114	0,93	LRN650X195	5000	2350	1,37	23,09	367	2,26	369	195	390
LRS650X208	2400	1050	0,62	6,49	114	0,87	LRN650X208	4600	2050	1,29	21,65	367	2,11	373	208	420
Diametro elastomero / Elastomer diameter D = 700																
LRS700X70	3450	3450	2,13	22,79	134	3,01	LRN700X70	6550	6550	4,41	77,16	439	7,38	184	70	140
LRS700X84	3950	3950	1,77	18,99	134	2,50	LRN700X84	7500	7500	3,68	64,30	439	6,12	209	84	170
LRS700X98	4250	4250	1,52	16,28	134	2,13	LRN700X98	8100	8100	3,15	55,11	439	5,23	236	98	200
LRS700X112	4450	4000	1,33	14,24	134	1,86	LRN700X112	8550	7600	2,76	48,22	439	4,57	258	112	230
LRS700X126	4600	3350	1,18	12,66	134	1,65	LRN700X126	8800	6350	2,45	42,87	439	4,05	280	126	260
LRS700X140	4750	2900	1,06	11,40	134	1,50	LRN700X140	9100	5500	2,21	38,58	439	3,69	311	140	280
LRS700X154	4400	2450	0,97	10,36	134	1,36	LRN700X154	8350	4700	2,01	35,07	439	3,35	324	154	310
LRS700X168	3950	2150	0,89	9,50	134	1,25	LRN700X168	7550	4050	1,84	32,15	439	3,06	346	168	340
LRS700X182	3600	1850	0,82	8,77	134	1,15	LRN700X182	6850	3500	1,70	29,68	439	2,82	356	182	370
LRS700X196	3300	1600	0,76	8,14	134	1,07	LRN700X196	6250	3050	1,58	27,56	439	2,62	377	196	400
LRS700X210	3000	1400	0,71	7,60	134	1,00	LRN700X210	5750	2700	1,47	25,72	439	2,46	384	210	420
Diametro elastomero / Elastomer diameter D = 750																
LRS750X75	3950	3950	2,28	24,81	156	3,23	LRN750X75	7550	7550	4,74	81,72	499	7,88	189	75	150
LRS750X90	4550	4550	1,90	20,68	156	2,70	LRN750X90	8650	8650	3,95	68,10	499	6,57	215	90	180
LRS750X105	4900	4900	1,63	17,72	156	2,31	LRN750X105	9400	9400	3,38	58,37	499	5,63	243	105	210
LRS750X120	5200	4600	1,42	15,51	156	2,02	LRN750X120	9900	8900	2,96	51,07	499	4,92	273	120	240
LRS750X135	5350	3900	1,27	13,78	156	1,80	LRN750X135	10250	7500	2,63	45,40	499	4,38	297	135	270
LRS750X150	5100	3350	1,14	12,41	156	1,62	LRN750X150	10500	6400	2,37	40,86	499	3,94	321	150	300
LRS750X165	5000	2850	1,04	11,28	156	1,47	LRN750X165	9700	5500	2,15	37,14	499	3,58	345	165	330
LRS750X180	4550	2500	0,95	10,34	156	1,35	LRN750X180	8750	4750	1,97	34,05	499	3,28	358	180	360
LRS750X195	4150	2150	0,88	9,54	156	1,24	LRN750X195	7950	4150	1,82	31,43	499	3,03	381	195	390
LRS750X210	3800	1900	0,81	8,86	156	1,16	LRN750X210	7250	3600	1,69	29,18	499	2,81	391	210	420
Diametro elastomero / Elastomer diameter D = 800																
LRS800X80	4450	4450	2,43	26,83	180	3,46	LRN800X80	8600	8600	5,06	86,28	562	8,38	218	80	160
LRS800X96	5100	5100	2,03	22,36	180	2,85	LRN800X96	9800	9800	4,21	71,90	562	6,87	246	96	200
LRS800X112	5550	5550	1,74	19,17	180	2,45	LRN800X112	10700	10700	3,61	61,63	562	5,92	276	112	230
LRS800X128	5900	5250	1,52	16,77	180	2,15	LRN800X128	11300	10100	3,16	53,92	562	5,20	301	128	260
LRS800X144	6100	4450	1,35	14,91	180	1,92	LRN800X144	11700	8550	2,81	47,93	562	4,64	334	144	290
LRS800X160	6250	3800	1,22	13,42	180	1,73	LRN800X160	12000	7300	2,53	43,14	562	4,19	360	160	320
LRS800X176	5700	3250	1,10	12,20	180	1,56	LRN800X176	10950	6150	2,29	40,74	583	3,82	376	176	360
LRS800X208	4750	2450	0,93	10,32	180	1,33	LRN800X208	9100	4700	1,95	33,18	562	3,21	414	208	420

Legenda | Legend**LRS**LRS $\xi_r = 10\%$ - $G = 0,4$ MPa**LRN**LRN $\xi_r = 4\%$ - $G = 0,9$ MPa**Dati tecnici | Technical Data****V_{max}** Carico verticale massimo allo SLU con spostamento nullo*Max vertical load at ULS (Ultimate Limit State) with zero displacement***V_{sis}** Carico verticale in condizione sismica**K_r** Rigidezza orizzontale (contributo elastomero)**K_{lead}** Rigidezza orizz. (contr. nucleo in piombo)**F_y** Carico di snervamento del nucleo**K_{eff}** Rigidezza orizzontale efficace**S_{max}** Spostamento di progetto | *Design displacement* ξ_r Smorzamento viscoso della gomma*Viscous damping of the rubber* β_{eff} Smorzamento efficace | *Effective damping***Dati geometrici | Geometrical Data****te** Spessore elastomero**H** Altezza totale isolatore**D** Diametro elastomero**B** Dimensione d'ingombro dell'isolatore*(nelle due direzioni)***Z** Interasse degli ancoraggi (nelle due direzioni)*(in two directions)* $\beta_{eff} = 28\%$ per tutti gli isolatori
for all isolators**B = D + 50****Z = 0,75 x B**

LRS	V _{max} [kN]	V _{sis} [kN]	K _r [kN/mm]	K _{lead} [kN/mm]	F _y [kN]	K _{eff} [kN/mm]	LRN	V _{max} [kN]	V _{sis} [kN]	K _r [kN/mm]	K _{lead} [kN/mm]	F _y [kN]	K _{eff} [kN/mm]	H [mm]	te [mm]	S _{max} [mm]
Diametro elastomero / Elastomer diameter D = 900																
LRS900X90	5700	5700	2,74	29,04	220	3,86	LRN900X90	10900	10900	5,68	98,73	723	9,48	232	90	180
LRS900X108	6550	6550	2,28	24,20	220	3,20	LRN900X108	12450	12450	4,73	82,27	723	7,84	263	108	220
LRS900X126	7100	7100	1,96	20,74	220	2,73	LRN900X126	13500	13500	4,06	70,52	723	6,68	296	126	260
LRS900X144	7500	6750	1,71	18,15	220	2,40	LRN900X144	14350	12900	3,55	61,70	723	5,91	324	144	290
LRS900X162	7750	5650	1,52	16,13	220	2,13	LRN900X162	14800	10800	3,15	54,85	723	5,23	360	162	330
LRS900X180	8000	4850	1,37	14,52	220	1,93	LRN900X180	15200	9300	2,84	49,36	723	4,74	389	180	360
LRS900X198	7400	4150	1,24	13,20	220	1,75	LRN900X198	14050	7950	2,58	44,88	723	4,29	418	198	400
LRS900X216	6650	3600	1,14	12,10	220	1,60	LRN900X216	12700	6850	2,37	41,14	723	3,92	436	216	440
Diametro elastomero / Elastomer diameter D = 1000																
LRS1000X100	7050	7050	3,04	33,08	278	4,31	LRN1000X100	13550	13550	6,32	107,84	878	10,47	262	100	200
LRS1000X120	8100	8100	2,53	27,57	278	3,59	LRN1000X120	15550	15550	5,27	89,87	878	8,72	300	120	240
LRS1000X140	8850	8850	2,17	23,63	278	3,08	LRN1000X140	16950	16950	4,52	77,03	878	7,48	336	140	280
LRS1000X160	9300	8400	1,90	20,68	278	2,70	LRN1000X160	17850	16100	3,95	67,40	878	6,54	367	160	320
LRS1000X180	9650	7100	1,69	18,38	278	2,40	LRN1000X180	18500	13600	3,51	59,91	878	5,82	406	180	360
LRS1000X200	9850	6050	1,52	16,54	278	2,16	LRN1000X200	18900	11600	3,16	53,92	878	5,23	438	200	400
LRS1000X220	9150	5200	1,38	15,04	278	1,96	LRN1000X220	17550	10000	2,87	49,02	878	4,76	470	220	440
LRS1000X240	8250	4500	1,27	13,78	278	1,80	LRN1000X240	15850	8650	2,63	44,94	878	4,36	491	240	480
Diametro elastomero / Elastomer diameter D = 1100																
LRS1100X110	8550	8550	3,34	37,13	342	4,77	LRN1100X110	16350	16350	6,94	120,29	1077	11,57	276	110	220
LRS1100X132	9750	9750	2,78	30,94	342	3,95	LRN1100X132	18700	18700	5,79	100,25	1077	9,56	317	132	270
LRS1100X154	10650	10650	2,39	26,52	342	3,40	LRN1100X154	20450	20450	4,96	85,92	1077	8,24	356	154	310
LRS1100X176	11200	10100	2,09	23,20	342	2,96	LRN1100X176	21450	19350	4,34	75,18	1077	7,17	390	176	360
LRS1100X198	11650	8550	1,86	20,63	342	2,64	LRN1100X198	22300	16400	3,86	66,83	1077	6,40	432	198	400
LRS1100X220	11950	7350	1,67	18,56	342	2,38	LRN1100X220	22900	14050	3,47	60,15	1077	5,78	476	220	440
LRS1100X242	11000	6250	1,52	16,88	342	2,16	LRN1100X242	21250	12000	3,16	54,68	1077	5,23	502	242	490
Diametro elastomero / Elastomer diameter D = 1200																
LRS1200X120	10200	10200	3,65	39,33	397	5,16	LRN1200X120	19550	19550	7,59	129,41	1265	12,56	290	120	240
LRS1200X144	11700	11700	3,04	32,78	397	4,29	LRN1200X144	22350	22350	6,30	110,63	1295	10,53	334	144	290
LRS1200X168	12750	12750	2,61	28,09	397	3,67	LRN1200X168	24250	24250	5,40	94,82	1295	9,01	376	168	340
LRS1200X192	13400	12150	2,28	24,58	397	3,21	LRN1200X192	25550	25550	4,73	82,97	1295	7,87	420	192	390
LRS1200X216	13900	10200	2,03	21,85	397	2,85	LRN1200X216	26450	19450	4,20	73,75	1295	6,99	458	216	440
LRS1200X240	14300	8800	1,82	19,67	397	2,58	LRN1200X240	27400	16850	3,79	64,71	1265	6,28	505	240	480
LRS1200X264	13300	7550	1,66	17,88	397	2,34	LRN1200X264	25350	14400	3,44	60,34	1295	5,75	534	264	530
Diametro elastomero / Elastomer diameter D = 1400																
LSR1400X140	13900	13900	4,26	45,58	537	6,01	LRN1400X140	26500	26500	8,83	154,32	1757	14,76	318	140	280
LSR1400X168	15950	15950	3,54	39,52	556	5,05	LRN1400X168	30500	30500	7,36	128,60	1757	12,24	363	168	340
LSR1400X196	17300	17300	3,04	33,87	556	4,31	LRN1400X196	33100	33100	6,31	110,23	1757	10,46	416	196	400
LSR1400X224	18350	16650	2,66	29,64	556	3,79	LRN1400X224	35050	31800	5,52	96,45	1757	9,21	466	224	450
LSR1400X252	18950	14000	2,36	26,35	556	3,36	LRN1400X252	36250	26750	4,90	85,73	1757	8,16	518	252	510

ALGA

Dispositivos pendulares

Isolatori a pendolo scorrevole Friction pendulum isolators

R = Raggio / Radius

Disp. = Spostamento / Displacement

SLU = Portata max SLU / Max load ULS

SLS = Portata max SLS / Max vertical load SLS

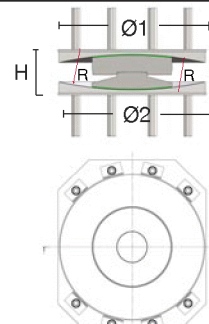
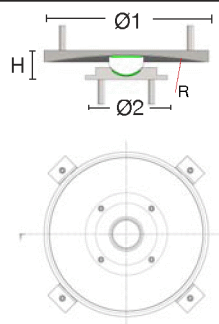
Kv = Rigidezza verticale / Vertical stiffness

Kg = Peso / Weight

Ø1 = Diametro superiore / Upper diameter

Ø2 = Diametro inferiore / Lower diameter

H = Altezza / Height



NOME / NAME	R	Disp	SLU	SLS	Kv	APS 1				APS 2			
						Kg	Ø1	Ø2	H	Kg	Ø1	Ø2	H
							(mm)	(mm)	(mm)		(mm)	(mm)	(mm)
APS 1000/300	4000	±150	1000	700	2100000	100	500	200	100	90	350	350	110
APS 1000/400	4000	±200	1000	700	2100000	135	600	200	100	115	400	400	110
APS 1000/500	4000	±250	1000	700	2100000	190	700	200	100	150	450	450	110
APS 1000/600	4000	±300	1000	700	2100000	265	800	200	100	190	500	500	110
APS 1000/700	4000	±350	1000	700	2100000	360	900	200	100	240	550	550	110
APS 1000/800	4000	±400	1000	700	2100000	490	1000	200	100	305	600	600	110
APS 1500/300	4000	±150	1500	1000	2100000	125	530	230	105	120	380	380	120
APS 1500/400	4000	±200	1500	1000	2100000	165	630	230	105	150	430	430	120
APS 1500/500	4000	±250	1500	1000	2100000	225	730	230	105	185	480	480	120
APS 1500/600	4000	±300	1500	1000	2100000	305	830	230	105	235	530	530	120
APS 1500/700	4000	±350	1500	1000	2100000	410	930	230	105	295	580	580	120
APS 1500/800	4000	±400	1500	1000	2100000	550	1030	230	105	365	630	630	120
APS 2000/300	4000	±150	2000	1350	2100000	150	560	260	105	155	410	410	130
APS 2000/400	4000	±200	2000	1350	2100000	195	660	260	105	190	460	460	130
APS 2000/500	4000	±250	2000	1350	2100000	260	760	260	105	230	510	510	130
APS 2000/600	4000	±300	2000	1350	2100000	350	860	260	105	285	560	560	130
APS 2000/700	4000	±350	2000	1350	2100000	465	960	260	105	355	610	610	130
APS 2000/800	4000	±400	2000	1350	2100000	615	1060	260	105	435	660	660	130
APS 2500/300	4000	±150	2500	1700	2100000	185	590	290	110	195	440	440	140
APS 2500/400	4000	±200	2500	1700	2100000	240	690	290	110	235	490	490	140
APS 2500/500	4000	±250	2500	1700	2100000	310	790	290	110	285	540	540	140
APS 2500/600	4000	±300	2500	1700	2100000	405	890	290	110	345	590	590	140
APS 2500/700	4000	±350	2500	1700	2100000	530	990	290	110	425	640	640	140
APS 2500/800	4000	±400	2500	1700	2100000	690	1090	290	110	515	690	690	140
APS 3000/300	4000	±150	3000	2000	2100000	215	610	310	115	230	460	460	150
APS 3000/400	4000	±200	3000	2000	2100000	270	710	310	115	275	510	510	150
APS 3000/500	4000	±250	3000	2000	2100000	345	810	310	115	330	560	560	150
APS 3000/600	4000	±300	3000	2000	2100000	445	910	310	115	395	610	610	150
APS 3000/700	4000	±350	3000	2000	2100000	580	1010	310	115	480	660	660	150
APS 3000/800	4000	±400	3000	2000	2100000	750	1110	310	115	580	710	710	150
APS 4000/300	4000	±150	4000	2700	2100000	275	650	350	120	305	500	500	160
APS 4000/400	4000	±200	4000	2700	2100000	340	750	350	120	355	550	550	160
APS 4000/500	4000	±250	4000	2700	2100000	425	850	350	120	420	600	600	160
APS 4000/600	4000	±300	4000	2700	2100000	535	950	350	120	500	650	650	160
APS 4000/700	4000	±350	4000	2700	2100000	685	1050	350	120	595	700	700	160
APS 4000/800	4000	±400	4000	2700	2100000	870	1150	350	120	715	750	750	160
APS 5000/300	4000	±150	5000	3350	2100000	335	680	380	125	370	530	530	170
APS 5000/400	4000	±200	5000	3350	2100000	400	780	380	125	430	580	580	170
APS 5000/500	4000	±250	5000	3350	2100000	495	880	380	125	505	630	630	170
APS 5000/600	4000	±300	5000	3350	2100000	615	980	380	125	595	680	680	170
APS 5000/700	4000	±350	5000	3350	2100000	775	1080	380	125	705	730	730	170
APS 5000/800	4000	±400	5000	3350	2100000	975	1180	380	125	830	780	780	170

ALGA

Amortiguadores viscosos

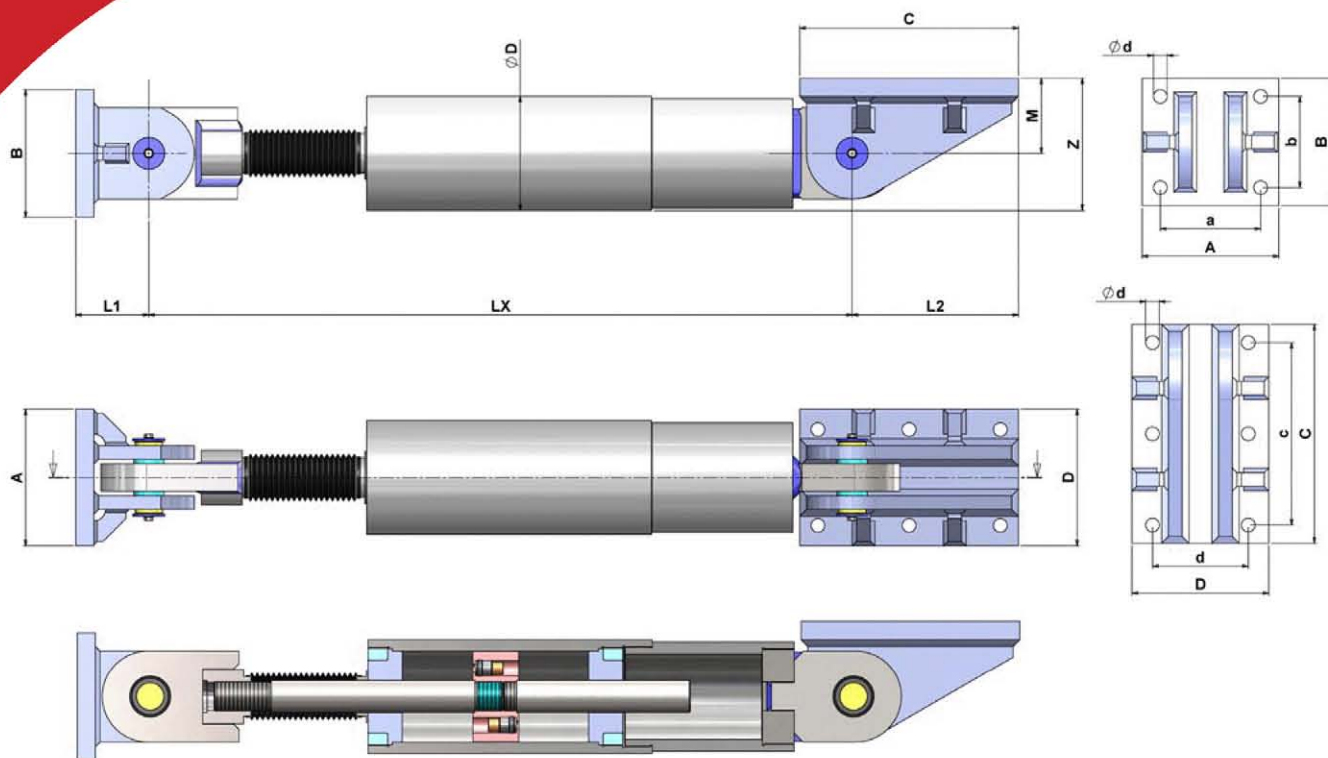


TABELLA DIMENSIONALE / DIMENSIONAL TABLE

Sigla / Mark	Mov.	Dimensioni / Size						Ancoraggi / Anchors									
		Lx	L1	L2	M	Z	D	A	B	a	b	n°/d	C	D	c	d	n°/d
FD 1000/200	±100	1400	210	320	180	300	250	380	440	270	330	4/50	470	380	360	270	6/60
FD 1000/300	±150	1700	210	320	180	300	250	380	440	270	330	4/50	470	380	360	270	6/60
FD 1000/400	±200	2000	210	320	180	300	250	380	440	270	330	4/50	470	380	360	270	6/60
FD 1500/200	±100	1500	250	380	210	310	250	480	480	350	350	4/60	550	430	430	300	6/70
FD 1500/300	±150	1800	250	380	210	310	250	480	480	350	350	4/60	550	430	430	300	6/70
FD 1500/400	±200	2100	250	380	210	310	250	480	480	350	350	4/60	550	430	430	300	6/70
FD 2000/200	±100	1600	280	540	240	360	300	550	550	370	370	4/70	730	450	600	320	8/70
FD 2000/300	±150	1900	280	540	240	360	300	550	550	370	370	4/70	730	450	600	320	8/70
FD 2000/400	±200	2200	280	540	240	360	300	550	550	370	370	4/70	730	450	600	320	8/70
FD 2500/200	±100	1700	330	590	270	400	335	550	550	370	370	4/70	810	510	670	370	8/80
FD 2500/300	±150	2000	330	590	270	400	335	550	550	370	370	4/70	810	510	670	370	8/80
FD 2500/400	±200	2300	330	590	270	400	335	550	550	370	370	4/70	810	510	670	370	8/80
FD 3000/200	±100	1800	360	640	300	440	360	550	550	370	370	4/80	880	550	730	400	8/90
FD 3000/300	±150	2100	360	640	300	440	360	550	550	370	370	4/80	880	550	730	400	8/90
FD 3000/400	±200	2400	360	640	300	440	360	550	550	370	370	4/80	880	550	730	400	8/90
FD 3500/200	±100	1900	380	760	320	480	400	550	550	370	370	4/80	1000	560	850	410	8/90
FD 3500/300	±150	2200	380	760	320	480	400	550	550	370	370	4/80	1000	560	850	410	8/90
FD 3500/400	±200	2500	380	760	320	480	400	550	550	370	370	4/80	1000	560	850	410	8/90
FD 4000/200	±100	2000	420	890	350	510	420	600	700	400	500	6/80	1160	580	1000	430	10/90
FD 4000/300	±150	2300	420	890	350	510	420	600	700	400	500	6/80	1160	580	1000	430	10/90
FD 4000/400	±200	2600	420	890	350	510	420	600	700	400	500	6/80	1160	580	1000	430	10/90

* tutte le dimensioni e spostamenti sono espressi in mm / all dimensions and movements are in mm

** Le forze sono allo Stato Limite Ultimo e sono espresse in kN / Forces are in kN at ULS

FIP INDUSTRIALE

Apoyos elastoméricos con núcleo de plomo

Spostamento 100 mm

LRB-S	V	F _{zd}	K _e	ξ _e	F ₂	F ₁	d ₁	K _v	D _g	t _e	h	H	Z
	kN	kN	kN/mm	%	KN	KN	mm	kN/mm	mm	mm	mm	mm	mm
			per d ₂ ^{SLV} = 83 mm										
LRB-S 500/100-110	2700	3630	1.94	35	162	106	8	1164	500	100	197	247	550
LRB-S 550/100-120	4170	5430	2.33	35	194	126	8	1579	550	100	197	247	600
LRB-S 600/102-120	4830	6500	2.49	33	207	128	8	1715	600	102	190	240	650
LRB-S 650/102-120	6440	9190	2.68	30	223	129	8	2235	650	102	200	260	700
LRB-S 700/105-115	7250	10570	2.74	27	228	121	8	2374	700	105	197	257	750
LRB-S 750/112-125	9240	12530	3.08	28	257	143	9	2754	750	112	207	267	800
LRB-S 800/128-130	10310	13190	3.20	29	267	155	10	2577	800	128	223	283	850
LRB-S 850/128-130	12660	17040	3.40	27	284	157	10	3130	850	128	223	283	900
LRB-S 900/126-140	13490	19250	3.91	28	326	182	10	3359	900	126	228	288	950
LRB-S 1000/135-150	19280	26760	4.50	27	375	210	11	4344	1000	135	251	331	1050
LRB-S 1100/150-160	24050	32410	5.01	27	418	241	12	4725	1100	150	266	346	1150
LRB-S 1200/154-160	29180	38760	5.42	25	452	247	12	5498	1200	154	266	346	1250

LRB-SN	V	F _{zd}	K _e	ξ _e	F ₂	F ₁	d ₁	K _v	D _g	t _e	h	H	Z
	kN	kN	kN/mm	%	KN	KN	mm	kN/mm	mm	mm	mm	mm	mm
			per d ₂ ^{SLV} = 83 mm										
LRB-SN 500/100-110	4050	6060	2.32	30	193	109	8	1424	500	100	197	247	550
LRB-SN 550/100-120	6260	9060	2.78	29	232	130	8	1892	550	100	197	247	600
LRB-SN 600/102-120	7250	10830	3.02	27	252	132	8	2091	600	102	190	240	650
LRB-SN 650/114-130	9760	13520	3.35	28	279	155	9	2366	650	114	218	278	700
LRB-SN 700/126-140	10540	14260	3.70	29	308	180	10	2339	700	126	227	287	750
LRB-SN 750/126-140	13950	17170	3.97	27	331	182	10	2890	750	126	227	287	800
LRB-SN 800/136-145	15210	18010	4.23	27	352	197	11	2904	800	136	234	294	850
LRB-SN 850/144-155	17420	20410	4.66	28	389	225	12	3267	850	144	245	305	900
LRB-SN 900/144-160	20360	27260	5.10	27	425	241	12	3509	900	144	254	314	950
LRB-SN 1000/153-170	29090	33970	5.85	27	488	275	12	4489	1000	153	277	357	1050
LRB-SN 1100/170-185	33050	37200	6.65	27	554	327	14	4883	1100	170	294	374	1150
LRB-SN 1200/176-185	36490	40620	7.15	25	596	336	14	5651	1200	176	296	376	1250

Legenda

V	Carico verticale massimo agente sull'isolatore in presenza del sisma corrispondente allo SLC (allo spostamento d ₂ ^{SLC})
F _{zd}	Carico verticale massimo allo SLU in esercizio
K _e	Rigidezza orizzontale equivalente (allo spostamento d ₂ ^{SLV})
ξ _e	Coefficiente di smorzamento viscoso equivalente (allo spostamento d ₂ ^{SLV})
F ₂	Forza massima (allo spostamento d ₂ ^{SLV})
F ₁	Forza al limite elastico
d ₁	Spostamento al limite elastico
K _v	Rigidezza verticale
D _g	Diametro elastomero
t _e	Spessore totale gomma
h	Altezza isolatore escluse piastre di ancoraggio
H	Altezza totale incluse piastre di ancoraggio
Z	Lato piastre di ancoraggio

N.B. Lo spostamento in intestazione pagina è da intendersi come d₂^{SLC}

Spostamento 150 mm

LRB-S	V	F _{zd}	K _e	ξ _e	F ₂	F ₁	d ₁	K _v	D _g	t _e	h	H	Z
	kN	kN	kN/mm	%	KN	KN	mm	kN/mm	mm	mm	mm	mm	mm
			per d ₂ ^{SLV} = 125 mm										
LRB-S 500/100-110	2130	3630	1.55	31	193	106	8	1164	500	100	197	247	550
LRB-S 550/100-120	3070	5430	1.86	30	232	126	8	1579	550	100	197	247	600
LRB-S 600/102-120	3630	6500	2.01	28	252	128	8	1715	600	102	190	240	650
LRB-S 650/102-120	4920	9190	2.21	26	276	129	8	2235	650	102	200	260	700
LRB-S 700/105-115	5650	10560	2.30	23	287	121	8	2374	700	105	197	257	750
LRB-S 750/112-125	7350	12530	2.56	24	321	143	9	2754	750	112	207	267	800
LRB-S 800/128-130	8420	13190	2.64	25	331	155	10	2577	800	128	223	283	850
LRB-S 850/128-130	10430	17040	2.85	23	356	157	10	3130	850	128	223	283	900
LRB-S 900/126-140	11160	19250	3.26	23	408	182	10	3359	900	126	228	288	950
LRB-S 1000/135-150	16270	26760	3.76	23	470	210	11	4344	1000	135	251	331	1050
LRB-S 1100/150-160	20680	32410	4.17	23	521	241	12	4725	1100	150	266	346	1150
LRB-S 1200/154-160	25350	38760	4.57	21	572	247	12	5498	1200	154	266	346	1250

LRB-SN	V	F _{zd}	K _e	ξ _e	F ₂	F ₁	d ₁	K _v	D _g	t _e	h	H	Z
	kN	kN	kN/mm	%	KN	KN	mm	kN/mm	mm	mm	mm	mm	mm
			per d ₂ ^{SLV} = 125 mm										
LRB-SN 500/100-110	3200	6060	1.92	25	240	109	8	1424	500	100	197	247	550
LRB-SN 550/100-120	4600	9060	2.31	25	288	130	8	1892	550	100	197	247	600
LRB-SN 600/102-120	5440	10830	2.55	22	318	132	8	2091	600	102	190	240	650
LRB-SN 650/114-130	7580	13520	2.79	24	349	155	9	2366	650	114	218	278	700
LRB-SN 700/126-140	8730	14260	3.05	25	382	180	10	2339	700	126	227	287	750
LRB-SN 750/126-140	11260	17170	3.32	23	415	182	10	2890	750	126	227	287	800
LRB-SN 800/136-145	12650	18010	3.53	23	441	197	11	2904	800	136	234	294	850
LRB-SN 850/144-155	15780	20410	3.87	24	484	225	12	3267	850	144	245	305	900
LRB-SN 900/144-160	17090	27260	4.26	23	532	241	12	3509	900	144	254	314	950
LRB-SN 1000/153-170	24840	33970	4.90	22	612	275	12	4489	1000	153	277	357	1050
LRB-SN 1100/170-185	30780	37200	5.52	23	690	327	14	4883	1100	170	294	374	1150
LRB-SN 1200/176-185	34230	40620	6.02	21	753	336	14	5651	1200	176	296	376	1250

Legenda

V	Carico verticale massimo agente sull'isolatore in presenza del sisma corrispondente allo SLC (allo spostamento d ₂ ^{SLC})
F _{zd}	Carico verticale massimo allo SLU in esercizio
K _e	Rigidezza orizzontale equivalente (allo spostamento d ₂ ^{SLV})
ξ _e	Coefficiente di smorzamento viscoso equivalente (allo spostamento d ₂ ^{SLV})
F ₂	Forza massima (allo spostamento d ₂ ^{SLV})
F ₁	Forza al limite elastico
d ₁	Spostamento al limite elastico
K _v	Rigidezza verticale
D _g	Diametro elastomero
t _e	Spessore totale gomma
h	Altezza isolatore escluse piastre di ancoraggio
H	Altezza totale incluse piastre di ancoraggio
Z	Lato piastre di ancoraggio

N.B. Lo spostamento in intestazione pagina è da intendersi come d₂^{SLC}

Spostamento 200 mm

LRB-S	V	F _{zd}	K _e	ξ _e	F ₂	F ₁	d ₁	K _v	D _g	t _e	h	H	Z
	kN	kN	kN/mm	%	KN	KN	mm	kN/mm	mm	mm	mm	mm	mm
			per d ₂ ^{SLV} = 167 mm										
LRB-S 500/100-110	1420	3630	1.35	27	224	106	8	1164	500	100	197	247	550
LRB-S 550/100-120	2120	5430	1.62	27	270	126	8	1579	550	100	197	247	600
LRB-S 600/102-120	2610	6500	1.78	24	296	128	8	1715	600	102	190	240	650
LRB-S 650/102-120	3620	9190	1.97	22	328	129	8	2235	650	102	200	260	700
LRB-S 700/105-115	4250	10570	2.08	19	347	121	8	2374	700	105	197	257	750
LRB-S 750/112-125	5680	12530	2.31	20	385	143	9	2754	750	112	207	267	800
LRB-S 800/128-130	6740	13190	2.37	21	394	155	10	2577	800	128	223	283	850
LRB-S 850/128-130	8420	17040	2.57	19	428	157	10	3130	850	128	223	283	900
LRB-S 900/126-140	9070	19250	2.94	20	490	182	10	3359	900	126	228	288	950
LRB-S 1000/135-150	13510	26760	3.39	20	565	210	11	4344	1000	135	251	331	1050
LRB-S 1100/150-160	17580	32410	3.75	20	625	241	12	4725	1100	150	266	346	1150
LRB-S 1200/154-160	21780	38760	4.15	18	692	247	12	5498	1200	154	266	346	1250

LRB-SN	V	F _{zd}	K _e	ξ _e	F ₂	F ₁	d ₁	K _v	D _g	t _e	h	H	Z
	kN	kN	kN/mm	%	KN	KN	mm	kN/mm	mm	mm	mm	mm	mm
			per d ₂ ^{SLV} = 167 mm										
LRB-SN 500/100-110	2130	6060	1.72	21	287	109	8	1424	500	100	197	247	550
LRB-SN 550/100-120	3190	9060	2.07	21	345	130	8	1892	550	100	197	247	600
LRB-SN 600/102-120	3910	10830	2.31	19	385	132	8	2091	600	102	190	240	650
LRB-SN 650/114-130	5690	13520	2.51	20	419	155	9	2366	650	114	218	278	700
LRB-SN 700/126-140	6780	14260	2.73	21	455	180	10	2339	700	126	227	287	750
LRB-SN 750/126-140	8870	17170	3.00	19	500	182	10	2890	750	126	227	287	800
LRB-SN 800/136-145	10200	18010	3.19	19	531	197	11	2904	800	136	234	294	850
LRB-SN 850/144-155	12930	20410	3.47	20	579	225	12	3267	850	144	245	305	900
LRB-SN 900/144-160	14120	27260	3.83	20	639	241	12	3509	900	144	254	314	950
LRB-SN 1000/153-170	20940	33970	4.42	19	737	275	12	4489	1000	153	277	357	1050
LRB-SN 1100/170-185	27030	37200	4.95	20	825	327	14	4883	1100	170	294	374	1150
LRB-SN 1200/176-185	31990	40620	5.46	18	910	336	14	5651	1200	176	296	376	1250

Legenda

V	Carico verticale massimo agente sull'isolatore in presenza del sisma corrispondente allo SLC (allo spostamento d ₂ ^{SLC})
F _{zd}	Carico verticale massimo allo SLU in esercizio
K _e	Rigidezza orizzontale equivalente (allo spostamento d ₂ ^{SLV})
ξ _e	Coefficiente di smorzamento viscoso equivalente (allo spostamento d ₂ ^{SLV})
F ₂	Forza massima (allo spostamento d ₂ ^{SLV})
F ₁	Forza al limite elastico
d ₁	Spostamento al limite elastico
K _v	Rigidezza verticale
D _g	Diametro elastomero
t _e	Spessore totale gomma
h	Altezza isolatore escluse piastre di ancoraggio
H	Altezza totale incluse piastre di ancoraggio
Z	Lato piastre di ancoraggio

N.B. Lo spostamento in intestazione pagina è da intendersi come d₂^{SLC}

Spostamento 250 mm

LRB-S	V	F _{zd}	K _e	ξ _e	F ₂	F ₁	d _i	K _v	D _g	t _e	h	H	Z
	kN	kN	kN/mm	%	KN	KN	mm	kN/mm	mm	mm	mm	mm	mm
			per d ₂ ^{SLV} = 208 mm										
LRB-S 500/125-110	990	2900	1.08	27	224	106	10	932	500	125	237	287	550
LRB-S 550/125-120	1640	4340	1.29	27	270	126	10	1263	550	125	237	287	600
LRB-S 600/126-130	2040	5170	1.52	27	318	148	10	1366	600	126	226	276	650
LRB-S 650/126-140	2870	7230	1.78	26	371	172	10	1761	650	126	236	296	700
LRB-S 700/126-115	3540	8800	1.71	19	357	121	10	1978	700	126	227	287	750
LRB-S 750/126-125	4620	9530	1.98	19	413	143	10	2448	750	126	227	287	800
LRB-S 800/160-155	5730	10300	2.16	26	450	214	13	2010	800	160	267	327	850
LRB-S 850/144-150	6960	14890	2.42	22	504	203	12	2736	850	144	245	305	900
LRB-S 900/135-150	7440	17990	2.72	20	567	206	11	3110	900	135	241	301	950
LRB-S 1000/144-160	11340	26120	3.14	19	654	236	12	4046	1000	144	264	344	1050
LRB-S 1100/170-185	15330	29250	3.53	23	735	312	14	4108	1100	170	294	374	1150
LRB-S 1200/176-185	19320	37000	3.86	21	805	318	14	4751	1200	176	296	376	1250

LRB-SN	V	F _{zd}	K _e	ξ _e	F ₂	F ₁	d ₁	K _v	D _g	t _e	h	H	Z
	kN	kN	kN/mm	%	KN	KN	mm	kN/mm	mm	mm	mm	mm	mm
			per d ₂ ^{SLV} = 208 mm										
LRB-SN 500/125-130	1360	4630	1.55	26	322	148	10	1092	500	125	237	287	550
LRB-SN 550/125-120	2470	7240	1.66	21	345	130	10	1514	550	125	237	287	600
LRB-SN 600/126-120	3130	8760	1.86	19	388	132	10	1693	600	126	226	276	650
LRB-SN 650/138-130	4650	11170	2.05	20	428	155	11	1955	650	138	254	314	700
LRB-SN 700/140-140	5430	12830	2.36	20	492	180	11	2105	700	140	247	307	750
LRB-SN 750/140-140	7240	15900	2.60	18	542	182	11	2601	750	140	247	307	800
LRB-SN 800/144-155	8170	17920	2.97	19	618	222	12	2716	800	144	245	305	850
LRB-SN 850/160-170	10730	20250	3.19	21	664	265	13	2902	850	160	267	327	900
LRB-SN 900/171-185	12040	22940	3.49	23	728	312	14	2892	900	171	293	353	950
LRB-SN 1000/180-200	18100	33560	4.10	23	853	366	15	3737	1000	180	316	396	1050
LRB-SN 1100/190-200	23710	37010	4.49	21	934	374	15	4330	1100	190	322	402	1150
LRB-SN 1200/209-215	29400	40260	4.97	22	1036	434	17	4685	1200	209	341	421	1250

Legenda

V	Carico verticale massimo agente sull'isolatore in presenza del sisma corrispondente allo SLC (allo spostamento d ₂ ^{SLC})
F _{zd}	Carico verticale massimo allo SLU in esercizio
K _e	Rigidezza orizzontale equivalente (allo spostamento d ₂ ^{SLV})
ξ _e	Coefficiente di smorzamento viscoso equivalente (allo spostamento d ₂ ^{SLV})
F ₂	Forza massima (allo spostamento d ₂ ^{SLV})
F ₁	Forza al limite elastico
d ₁	Spostamento al limite elastico
K _v	Rigidezza verticale
D _g	Diametro elastomero
t _e	Spessore totale gomma
h	Altezza isolatore escluse piastre di ancoraggio
H	Altezza totale incluse piastre di ancoraggio
Z	Lato piastre di ancoraggio

N.B. Lo spostamento in intestazione pagina è da intendersi come d₂^{SLC}

Spostamento 300 mm

LRB-S	V	F _{zd}	K _e	ξ _e	F ₂	F ₁	d ₁	K _v	D _g	t _e	h	H	Z
	kN	kN	kN/mm	%	KN	KN	mm	kN/mm	mm	mm	mm	mm	mm
			per d ₂ ^{SLV} = 250 mm										
LRB-S 500/150-110	540	2420	0.90	27	224	106	12	776	500	150	277	327	550
LRB-S 550/150-120	1050	3620	1.08	27	270	126	12	1052	550	150	277	327	600
LRB-S 600/150-130	1500	4350	1.28	26	319	148	12	1148	600	150	262	312	650
LRB-S 650/150-140	2290	6070	1.49	26	373	172	12	1479	650	150	272	332	700
LRB-S 700/154-150	2780	6900	1.70	26	424	197	12	1550	700	154	267	327	750
LRB-S 750/154-160	3750	9200	1.94	26	485	225	12	1926	750	154	267	327	800
LRB-S 800/168-155	4630	9800	1.94	25	486	214	14	1915	800	168	278	338	850
LRB-S 850/168-150	5990	12760	2.05	22	513	203	14	2345	850	168	278	338	900
LRB-S 900/162-150	6610	15000	2.27	20	567	206	13	2592	900	162	280	340	950
LRB-S 1000/171-160	10200	21990	2.63	19	659	236	14	3407	1000	171	303	383	1050
LRB-S 1100/170-185	12870	29250	3.30	21	825	312	14	4108	1100	170	294	374	1150
LRB-S 1200/176-185	16470	37000	3.64	19	910	318	14	4751	1200	176	296	376	1250

LRB-SN	V	F _{zd}	K _e	ξ _e	F ₂	F ₁	d ₁	K _v	D _g	t _e	h	H	Z
	kN	kN	kN/mm	%	KN	KN	mm	kN/mm	mm	mm	mm	mm	mm
			per d ₂ ^{SLV} = 250 mm										
LRB-SN 500/150-130	710	3860	1.29	26	322	148	12	910	500	150	277	327	550
LRB-SN 550/150-145	1400	5740	1.58	27	394	184	12	1205	550	150	277	327	600
LRB-SN 600/150-150	2100	6990	1.80	25	451	198	12	1355	600	150	262	312	650
LRB-SN 650/150-170	3130	9630	2.19	26	547	253	12	1697	650	150	272	332	700
LRB-SN 700/154-160	4080	11350	2.27	23	566	229	12	1865	700	154	267	327	750
LRB-SN 750/154-170	5510	15130	2.59	22	647	259	12	2288	750	154	267	327	800
LRB-SN 800/168-155	6940	16340	2.52	19	630	222	14	2328	800	168	278	338	850
LRB-SN 850/168-170	8780	19600	2.90	20	725	265	14	2764	850	168	278	338	900
LRB-SN 900/171-185	9780	22940	3.27	21	817	312	14	2892	900	171	293	353	950
LRB-SN 1000/180-200	15080	33560	3.83	21	958	366	15	3737	1000	180	316	396	1050
LRB-SN 1100/190-200	20150	37010	4.22	19	1055	374	15	4330	1100	190	322	402	1150
LRB-SN 1200/209-215	26140	40260	4.67	19	1167	434	17	4685	1200	209	341	421	1250

Legenda

V	Carico verticale massimo agente sull'isolatore in presenza del sisma corrispondente allo SLC (allo spostamento d ₂ ^{SLC})
F _{zd}	Carico verticale massimo allo SLU in esercizio
K _e	Rigidezza orizzontale equivalente (allo spostamento d ₂ ^{SLV})
ξ _e	Coefficiente di smorzamento viscoso equivalente (allo spostamento d ₂ ^{SLV})
F ₂	Forza massima (allo spostamento d ₂ ^{SLV})
F ₁	Forza al limite elastico
d ₁	Spostamento al limite elastico
K _v	Rigidezza verticale
D _g	Diametro elastomero
t _e	Spessore totale gomma
h	Altezza isolatore escluse piastre di ancoraggio
H	Altezza totale incluse piastre di ancoraggio
Z	Lato piastre di ancoraggio

N.B. Lo spostamento in intestazione pagina è da intendersi come d₂^{SLC}

Spostamento 350 mm

LRB-S	V	F _{zd}	K _e	ξ _e	F ₂	F ₁	d ₁	K _v	D _g	t _e	h	H	Z
	kN	kN	kN/mm	%	KN	KN	mm	kN/mm	mm	mm	mm	mm	mm
			per d ₂ ^{SLV} = 292 mm										
LRB-S 500/175-110	240	2070	0.77	27	224	106	14	665	500	175	317	367	550
LRB-S 550/175-120	580	3100	0.92	27	270	126	14	902	550	175	317	367	600
LRB-S 600/180-130	900	3620	1.08	27	314	148	15	956	600	180	307	357	650
LRB-S 650/180-140	1530	5060	1.26	27	367	172	15	1232	650	180	317	377	700
LRB-S 700/175-150	2120	6080	1.48	26	430	197	14	1364	700	175	297	357	750
LRB-S 750/175-160	3030	8100	1.69	26	492	225	14	1695	750	175	297	357	800
LRB-S 800/176-175	3530	9150	1.95	27	570	268	14	1785	800	176	289	349	850
LRB-S 850/176-185	4870	11810	2.20	27	641	300	14	2160	850	176	289	349	900
LRB-S 900/180-195	5270	12940	2.42	27	707	333	15	2235	900	180	306	366	950
LRB-S 1000/180-200	8230	20250	2.81	24	819	354	15	3140	1000	180	316	396	1050
LRB-S 1100/190-200	11270	25900	3.07	22	894	360	15	3639	1100	190	322	402	1150
LRB-S 1200/187-200	14230	34520	3.48	20	1016	365	15	4435	1200	187	311	391	1250

LRB-SN	V	F _{zd}	K _e	ξ _e	F ₂	F ₁	d ₁	K _v	D _g	t _e	h	H	Z
	kN	kN	kN/mm	%	KN	KN	mm	kN/mm	mm	mm	mm	mm	mm
			per d ₂ ^{SLV} = 292 mm										
LRB-SN 500/175-130	290	3310	1.11	26	322	148	14	780	500	175	317	367	550
LRB-SN 550/175-145	730	4920	1.35	27	394	184	14	1033	550	175	317	367	600
LRB-SN 600/180-150	1230	5830	1.52	25	443	198	15	1129	600	180	307	357	650
LRB-SN 650/180-170	2050	8020	1.85	27	539	253	15	1414	650	180	317	377	700
LRB-SN 700/175-170	3010	9830	2.06	24	600	256	14	1618	700	175	297	357	750
LRB-SN 750/175-170	4450	13320	2.25	22	657	259	14	2013	750	175	297	357	800
LRB-SN 800/176-190	5130	14950	2.64	23	769	321	14	2137	800	176	289	349	850
LRB-SN 850/176-185	6900	19600	2.81	21	820	308	14	2600	850	176	289	349	900
LRB-SN 900/198-185	8500	19810	2.81	21	821	312	16	2498	900	198	332	392	950
LRB-SN 1000/180-200	12340	33560	3.64	19	1063	366	15	3737	1000	180	316	396	1050
LRB-SN 1100/220-200	18250	37010	3.64	19	1061	374	18	3740	1100	220	364	444	1150
LRB-SN 1200/242-215	23970	40260	4.02	19	1173	434	20	4046	1200	242	386	466	1250

Legenda

V	Carico verticale massimo agente sull'isolatore in presenza del sisma corrispondente allo SLC (allo spostamento d ₂ ^{SLC})
F _{zd}	Carico verticale massimo allo SLU in esercizio
K _e	Rigidezza orizzontale equivalente (allo spostamento d ₂ ^{SLV})
ξ _e	Coefficiente di smorzamento viscoso equivalente (allo spostamento d ₂ ^{SLV})
F ₂	Forza massima (allo spostamento d ₂ ^{SLV})
F ₁	Forza al limite elastico
d ₁	Spostamento al limite elastico
K _v	Rigidezza verticale
D _g	Diametro elastomero
t _e	Spessore totale gomma
h	Altezza isolatore escluse piastre di ancoraggio
H	Altezza totale incluse piastre di ancoraggio
Z	Lato piastre di ancoraggio

N.B. Lo spostamento in intestazione pagina è da intendersi come d₂^{SLC}

Spostamento 400 mm

LRB-S	V	F _{zd}	K _e	ξ _e	F ₂	F ₁	d ₁	K _v	D _g	t _e	h	H	Z
	kN	kN	kN/mm	%	KN	KN	mm	kN/mm	mm	mm	mm	mm	mm
			per d ₂ ^{SLV} = 333 mm										
LRB-S 500/200-110	50	1810	0.67	27	224	106	16	582	500	200	357	407	550
LRB-S 550/200-120	260	2710	0.81	27	270	126	16	789	550	200	357	407	600
LRB-S 600/204-130	500	3190	0.95	27	315	148	16	844	600	204	343	393	650
LRB-S 650/204-140	960	4460	1.11	27	368	172	16	1087	650	204	353	413	700
LRB-S 700/203-150	1390	5240	1.28	26	427	197	16	1176	700	203	337	397	750
LRB-S 750/203-160	2170	6980	1.46	26	488	225	16	1461	750	203	337	397	800
LRB-S 800/200-175	2810	8050	1.71	27	572	268	16	1571	800	200	322	382	850
LRB-S 850/200-185	3850	10350	1.93	27	643	300	16	1901	850	200	322	382	900
LRB-S 900/207-195	4540	11250	2.11	27	704	333	17	1943	900	207	345	405	950
LRB-S 1000/207-200	7290	17610	2.45	24	816	354	17	2731	1000	207	355	435	1050
LRB-S 1100/220-200	10230	22370	2.66	22	887	360	18	3143	1100	220	364	444	1150
LRB-S 1200/220-200	13240	29340	2.99	20	996	365	18	3770	1200	220	356	436	1250

LRB-SN	V	F _{zd}	K _e	ξ _e	F ₂	F ₁	d ₁	K _v	D _g	t _e	h	H	Z
	kN	kN	kN/mm	%	KN	KN	mm	kN/mm	mm	mm	mm	mm	mm
			per d ₂ ^{SLV} = 333 mm										
LRB-SN 500/200-130	10	2890	0.97	26	322	148	16	683	500	200	357	407	550
LRB-SN 550/200-145	280	4300	1.18	27	394	184	16	904	550	200	357	407	600
LRB-SN 600/204-150	660	5140	1.34	25	445	198	16	996	600	204	343	393	650
LRB-SN 650/204-170	1240	7080	1.62	27	541	253	16	1248	650	204	353	413	700
LRB-SN 700/203-170	1940	8480	1.79	24	595	256	16	1395	700	203	337	397	750
LRB-SN 750/203-170	3170	11480	1.95	22	651	259	16	1736	750	203	337	397	800
LRB-SN 800/200-190	4070	13160	2.32	23	772	321	16	1881	800	200	322	382	850
LRB-SN 850/200-185	5780	16910	2.47	21	823	308	16	2288	850	200	322	382	900
LRB-SN 900/225-185	6630	17430	2.47	21	824	312	18	2198	900	225	371	431	950
LRB-SN 1000/207-200	10940	29350	3.18	19	1058	366	17	3249	1000	207	355	435	1050
LRB-SN 1100/250-200	15630	32810	3.19	19	1065	374	20	3291	1100	250	406	486	1150
LRB-SN 1200/275-215	19840	38760	3.53	19	1177	434	22	3560	1200	275	431	511	1250

Legenda

V	Carico verticale massimo agente sull'isolatore in presenza del sisma corrispondente allo SLC (allo spostamento d ₂ ^{SLC})
F _{zd}	Carico verticale massimo allo SLU in esercizio
K _e	Rigidezza orizzontale equivalente (allo spostamento d ₂ ^{SLV})
ξ _e	Coefficiente di smorzamento viscoso equivalente (allo spostamento d ₂ ^{SLV})
F ₂	Forza massima (allo spostamento d ₂ ^{SLV})
F ₁	Forza al limite elastico
d ₁	Spostamento al limite elastico
K _v	Rigidezza verticale
D _g	Diametro elastomero
t _e	Spessore totale gomma
h	Altezza isolatore escluse piastre di ancoraggio
H	Altezza totale incluse piastre di ancoraggio
Z	Lato piastre di ancoraggio

N.B. Lo spostamento in intestazione pagina è da intendersi come d₂^{SLC}

FIP INDUSTRIALE

Dispositivos pendulares

Spostamento 200 mm	V	F _{zd}	R	μ	ξ _e	T	D	H
	kN	kN	mm		%	s	mm	mm
	per d ₂ ^{SLC} = 200 mm							
FIP-D 90/400 (2535)	500	900	2535	0.025	15.3	2.78	400	84
FIP-D 130/400 (2535)	1000	1300					430	89
FIP-D 260/400 (2535)	2000	2600					485	120
FIP-D 390/400 (2535)	3000	3900					535	141

Spostamento 250 mm	V	F _{zd}	R	μ	ξ _e	T	D	H
	kN	kN	mm		%	s	mm	mm
	per d ₂ ^{SLC} = 250 mm							
FIP-D 130/500 (3125)	1000	1300	3125	0.025	15.2	3.10	490	94
FIP-D 270/500 (3125)	2000	2700					550	118
FIP-D 400/500 (3125)	3000	4000					595	140

Spostamento 300 mm	V	F _{zd}	R	μ	ξ _e	T	D	H
	kN	kN	mm		%	s	mm	mm
	per d ₂ ^{SLC} = 300 mm							
FIP-D 180/600 (3725)	1000	1800	3725	0.025	15.1	3.38	570	102
FIP-D 275/600 (3725)	2000	2750					600	119
FIP-D 400/600 (3725)	3000	4000					655	138

Spostamento 350 mm	V	F _{zd}	R	μ	ξ _e	T	D	H
	kN	kN	mm		%	s	mm	mm
	per d ₂ ^{SLC} = 350 mm							
FIP-D 180/700 (3715)	1000	1800	3715	0.025	13.4	3.44	620	112
FIP-D 260/700 (3715)	2000	2600					655	120
FIP-D 400/700 (3715)	3000	4000					705	147

Spostamento 400 mm	V	F _{zd}	R	μ	ξ _e	T	D	H
	kN	kN	mm		%	s	mm	mm
	per d ₂ ^{SLC} = 400 mm							
FIP-D 170/800 (3705)	1000	1700	3705	0.025	12	3.48	670	117
FIP-D 260/800 (3705)	2000	2600					700	129
FIP-D 400/800 (3705)	3000	4000					755	158

Legenda

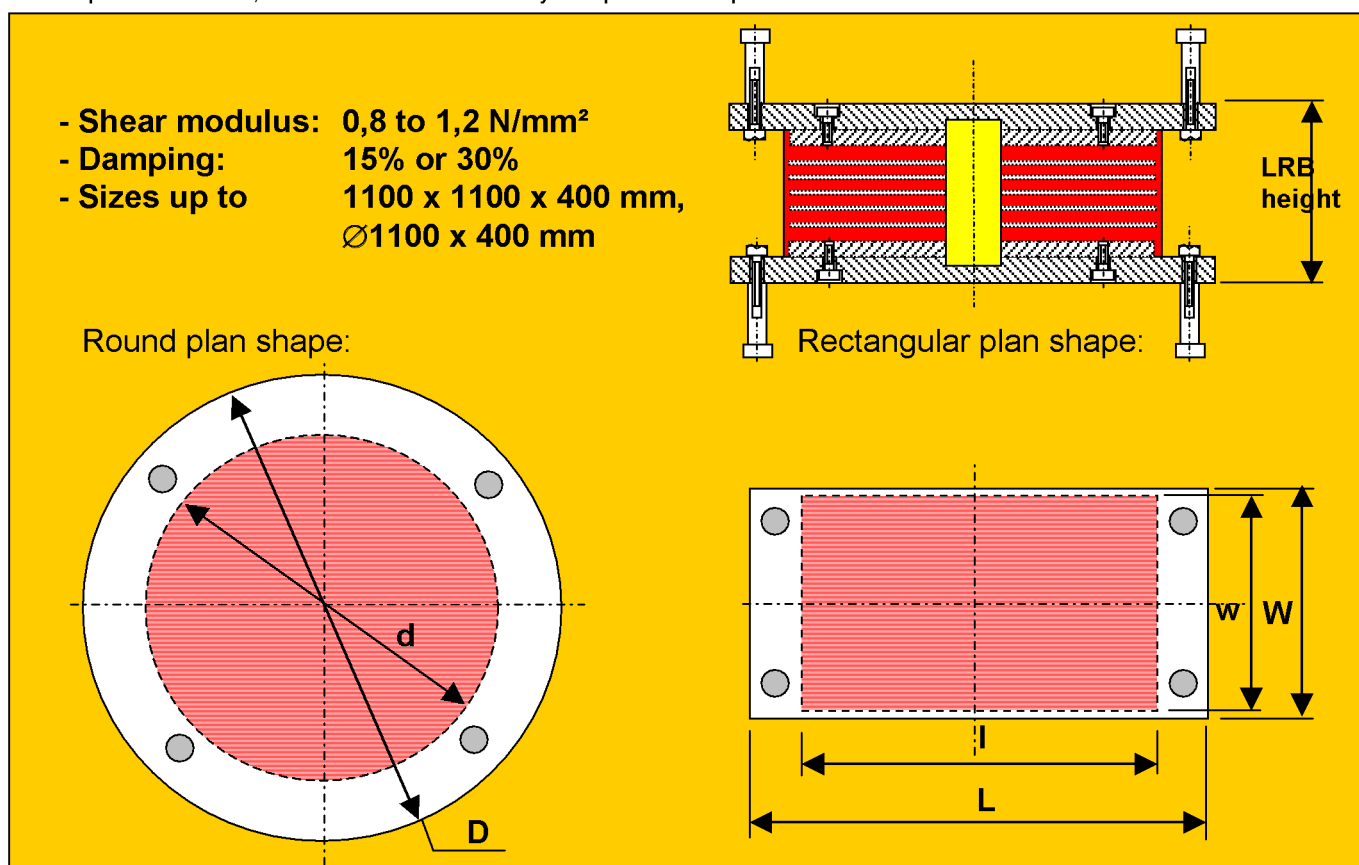
V	Carico verticale agente sull'isolatore in presenza di sisma (SLC)
F _{zd}	Carico verticale statico agente sull'isolatore (SLU)
R	Raggio di curvatura
μ	Coefficiente di attrito dinamico
ξ	Coefficiente di smorzamento viscoso equivalente (allo spostamento d ₂ ^{SLC})
T	Periodo (allo spostamento d ₂ ^{SLC})
D	Diametro esclude zanche di ancoraggio
H	Altezza esclude zanche di ancoraggio

MAURER SÖHNE

Apoyos elastoméricos con núcleo de plomo

Dimensions of MAURER-LRBs

The Maurer LRBs are available in round and rectangular plan shapes. The size is individually adapted to the request and also the lead core is adopted individually. The below mentioned sizes are just possible sizes, which will be individually adapted on request!



Vertical load* (MN)	Outline dimensions of isolator without anchor studs length (L) x width (W) or diameter (D) [mm]	Dimensions of rubber pad length (l) x width (w) or diameter (d) [mm]	Height values						
			Rubber height		Isolator height **		Rubber layer thickness		
			min [mm]	max [mm]	min [mm]	max [mm]	min [mm]	max [mm]	single layer [mm]
0,37 / 0,45	280 x 170 / 280 x 220	100 x 150 / 100 x 200	49	60	79	90	16	24	8
0,67 / 0,84 / 1,0 0,70 / 1,1	330 x 220 / 330 x 270 / 330 x 320 Ø 380 / Ø 430	150 x 200 / 150 x 250 / 150 x 300 Ø 200 / Ø 250	49	71	79	101	16	32	8
1,12 / 1,35 / 1,57 1,8 / 1,59	380 x 270 / 380 x 320 / 380 x 320 380 x 420 / Ø 480	200 x 250 / 200 x 300 / 200 x 350 200 x 400 / Ø 300	58	93	88	123	24	48	8
1,68 / 2,25 / 2,16	430 x 320 / 430 x 420 / Ø 530	250 x 300 / 250 x 400 / Ø 350	58	104	88	134	24	56	8
2,7 / 3,37 / 4,05 2,82 / 3,57	480 x 420 / 480 x 520 / 480 x 620 Ø 580 / Ø 630	300 x 400 / 300 x 500 / 300 x 600 Ø 400 / Ø 450	84	132	124	172	36	72	12
3,54 / 4,41	530 x 470 / Ø 680	350 x 450 / Ø 500	84	148	124	188	36	84	12
4,5 / 5,4 / 5,34	580 x 520 / 580 x 620 / Ø 730	400 x 500 / 400 x 600 / Ø 550	100	164	140	204	48	96	12
6,07 / 6,36	630 x 620 / Ø 780	450 x 600 / Ø 600	100	164	140	204	48	108	12
6,75 / 7,46	680 x 620 / Ø 830	500 x 600 / Ø 650	100	164	140	204	48	120	12
8,1 / 9,45 8,65 / 9,94	780 x 630 / 780 x 730 Ø 880 / Ø 930	600 x 600 / 600 x 700 Ø 700 / Ø 750	119	224	159	264	64	144	16
11,02 / 12,6 11,3 / 12,76	880 x 730 / 880 x 830 Ø 980 / Ø 1030	700 x 700 / 700 x 800 Ø 800 / Ø 850	119	224	159	264	64	160	16
14,4 / 14,3	980 x 830 / Ø 1080	800 x 800 / Ø 900	135	305	175	345	80	220	20
18,2	1080 x 930	900 x 900	135	305	175	345	80	220	20

* the final maximum vertical load is depending on applied standard and lead core size

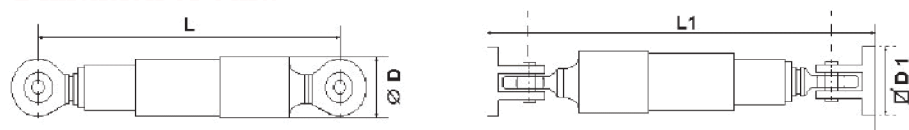
** the LRB height value is without anchor stud length, which is normally 180 mm or longer

Fig. 18: Sizes of LRBs

JARRET

Amortiguadores viscosos

Dimension of Units



Unit	L (mm)	L1 (mm)	D (mm)	D1 (mm)	Stroke (mm)	RM (KN)
ASR50-100	450	540	60	110	100	50
ASR100-100	490	610	90	110	100	100
ASR150-100	620	740	115	144	100	150
ASR300-100	720	860	155	176	100	300
ASR500-100	800	1000	170	210	100	500
ASR750-100	860	1110	230	280	100	750
ASR1000-100	930	1200	250	340	100	1000
ASR1250-100	1000	1300	280	340	100	1250
ASR1500-100	1050	1350	310	340	100	1500
ASR2000-100	1150	1470	430	360	100	2000
ASR2500-100	1250	1660	440	460	100	2500
ASR3000-100	1350	1760	450	460	100	3000

L = total length, at mid stroke, for S = 100 mm or +/-50 mm

For S < or > 100 mm, L = L + 2.5 (S - 100) All dimensions are subject to modification.