

Proyecto sísmico del nuevo puente de ferrocarril sobre el río Biobío en Chile mediante aisladores elastoméricos con núcleo de plomo

Seismic design of the new railway bridge over the Biobío River in Chile using Lead Rubber Bearing isolators (LRB)

Guillermo Blanco Fernández^a, Miguel Rupérez Astarloa^b, Alberto Curbelo Díaz^c,
Ginés Ladrón de Guevara Méndez^d, Rafael Guillén Carmona^e, Rafael Batista Terrones^f,

^a Ingeniero de Caminos, Canales y Puerto. MC2 Estudio de Ingeniería (Grupo TYPSA). Jefe de Proyectos. guillermo.blanco@mc2.es

^b Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. MC2 Estudio de Ingeniería (Grupo TYPSA). Jefe de Proyectos. miguel.ruperez@mc2.es

^c Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. MC2 Estudio de Ingeniería (Grupo TYPSA). Jefe de Proyectos. alberto.curbelo@mc2.es

^d Ingeniero de Caminos, Canales y Puerto. MC2 Estudio de Ingeniería (Grupo TYPSA). Directore de Proyectos. ginés@mc2.es

^e Ingeniero de Caminos, Canales y Puerto. SACYR. Jefe Estructuras Obra Civil Central. r Guillén@sacyr.com

^f Ingeniero de Caminos, Canales y Puerto. SACYR. Jefe de Oficina Técnica. r batista@sacyr.com

RESUMEN

El nuevo puente sobre el río Biobío entre las ciudades de Concepción y San Pedro de La Paz (Chile), de 1881 m de longitud, se emplaza en una zona de sismicidad elevada. Además, los diferentes elementos de subestructura del puente a lo largo de la traza presentan una gran irregularidad en su flexibilidad lateral, ya que abundan los estratos de suelos blandos y hay posibilidad de socavación. Se trata de un puente sometido a elevadas fuerzas inerciales y con propensión a la concentración del daño. Se ha dotado al puente de aisladores LRB (*Lead Rubber Bearings*) con los que se ha logrado uniformizar y reducir los esfuerzos sísmicos en la subestructura mediante mecanismos de aislamiento y disipación.

ABSTRACT

The new bridge over the Biobío River, connecting the cities of Concepción and San Pedro de La Paz (Chile), spans 1881 m in length and it is located in a region of high seismicity. Additionally, the different substructure elements of the bridge along its alignment exhibit significant irregularity in lateral flexibility due to the prevalence of soft soil layers and the potential for scour. This results in a bridge subjected to large inertial forces and prone to damage concentration. By implementing LRB (*Lead Rubber Bearings*), these effects have been mitigated, achieving a structure that standardizes and reduces forces on the substructure through isolation and energy dissipation mechanisms.

PALABRAS CLAVE: puente, sismo, terremoto, aislador, disipador, LRB, elastómero, plomo
KEYWORDS: bridge, earthquake, isolator, damper, LRB, rubber, lead

1. Introducción

El Puente Ferroviario Biobío, que se emplaza en la ciudad chilena de Concepción, es un puente de ferrocarril de 62 vanos y 1.88 km de longitud. El tablero se divide en tramos continuos de seis vanos de 30 m de luz, con juntas cada 180 m (Figura 1), y se ha proyectado para apoyar directamente sobre encepados de pilotes próximos al nivel del agua. Los pilotes presentan grandes longitudes, ya que abundan los estratos de suelos blandos y, además, se ha considerado una hipótesis de socavación del terreno de hasta 11 m. Puede encontrarse una descripción detallada del proyecto del puente en los artículos del IX Congreso de ACHE (2025) [1] y [2].

El emplazamiento se corresponde con una zona de muy alta sismicidad. Las elevadas aceleraciones sísmicas, junto con la concentración de la masa en un tablero muy elevado respecto a la cota de inicio de empotramiento de los pilotes (Δz de hasta 17 m), dan lugar a esfuerzos sísmicos de gran envergadura en la subestructura. Además, algunas de las alineaciones de subestructura tienden a absorber mayores reacciones dada la gran irregularidad de las condiciones del suelo a lo largo de toda la traza (i.e. hay zonas donde los

pilotes se empotran en roca o en suelos duros, y otras donde dominan los limos) o porque son más rígidas que el resto, como ocurre con los encepados a caballo de una junta entre tramos.

De cara a no sobredimensionar las secciones de los pilotes por criterios estrictamente sísmicos, lo cual además aumentaría la rigidez y con ello la propia aceleración de respuesta, y buscando también uniformizar las reacciones a lo largo del puente, se ha planteado una estrategia de protección sísmica mediante aisladores elastoméricos con núcleo de plomo (LRB).

Los aisladores LRB permiten aunar las propiedades de aislamiento aportadas por la baja rigidez transversal del elastómero, con la capacidad disipativa que aporta el trabajo conjunto de plomo y elastómero. De esta forma, se consigue alcanzar valores de periodo efectivo de vibración de entre 1.8 y 2.5 segundos, junto con valores de fracciones de amortiguamiento efectivo entre 15 % y 30 %.

Se han proyectado, ensayado y colocado 146 aisladores rectangulares agrupados en tres tipos distintos. En los encepados de junta se duplican los aisladores (ver Figura 1), puesto que no tendría sentido usar un mismo aislador para dos tramos de tablero distintos.

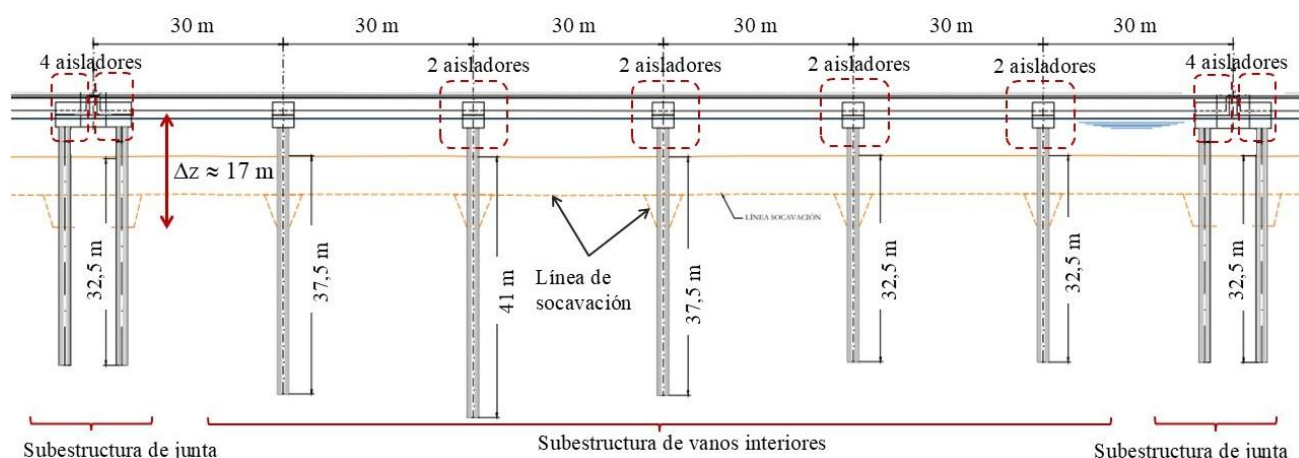


Figura 1. Alzado tipo de uno de los 10 tramos de vanos continuos.

2. Bases de cálculo

La normativa de aplicación es el Manual de Carreteras [3] de Chile. Sin embargo, para el proyecto de aisladores sísmicos, el código normativo a seguir debe ser la AASHTO [4], según indica el propio Manual de Carreteras. Adicionalmente, se ha hecho uso de las publicaciones [6], [7], [8] y [10] como fuente de consulta para el planteamiento del sistema de aislamiento.

El manual de carreteras prescribe que el nivel de riesgo sísmico para el sismo de proyecto DBE (*Design Basis Earthquake*) se corresponde con un periodo de retorno de 500 años (probabilidad de excedencia aproximada del 10 % en 50 años). Por otra parte, el Informe de Riesgo Sísmico [5] desarrollado para el proyecto establece que el sismo máximo posible MCE (*Maximum Credible Earthquake*), para el cual deben realizarse las comprobaciones de Estado Límite de Proximidad al Colapso (LS-NC en la normativa europea) es de 1000 años (probabilidad de excedencia aproximada del 5 % en 50 años). El Informe de Riesgo Sísmico también justifica y proporciona los valores de PGA (*Peak Ground Acceleration*) en roca para el DBE, de 0.6g, y para el MCE, de 0.75g, que dan lugar a los espectros de respuesta de la Figura 2 según la forma espectral definida en el Manual de Carreteras.

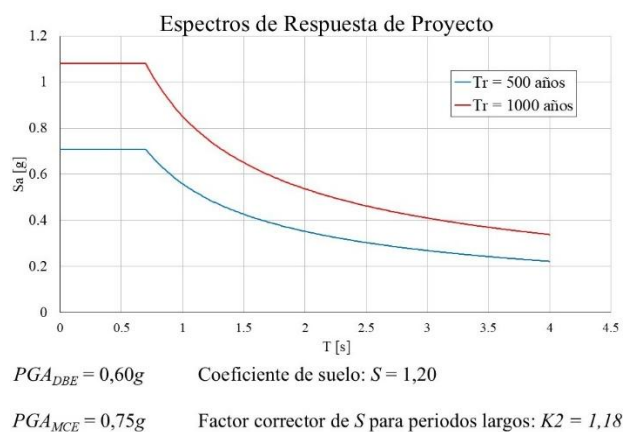


Figura 2. Espectro de respuesta de proyecto.

3. Diseño conceptual

El aislamiento sísmico se consigue mediante el apoyo de la superestructura sobre aisladores, que son elementos lateralmente flexibles, pero con elevada capacidad portante vertical. Dado que los aisladores son más flexibles que la estructura, la mayor parte de los movimientos laterales relativos se producen en los primeros, permitiendo reducir las aceleraciones sísmicas sufridas al aumentar el periodo de vibración de la estructura.

Con el fin de mejorar las prestaciones del aislador y controlar los desplazamientos del mismo, es habitual introducir un elemento con capacidad de disipación histerética, es decir, por medio de deformaciones plásticas o por mecanismos de fricción.

En fases preliminares de proyecto se estudió la posibilidad de utilizar aisladores de péndulo de fricción (FPS), sistema posteriormente descartado por producir desplazamientos excesivos en el caso concreto de este puente.

Los aisladores LRB son apoyos elastoméricos zunchados en el interior de los cuales se inserta un núcleo cilíndrico de plomo, que proporciona un amortiguamiento de tipo histerético con el que se disipa parte de la energía introducida por el terremoto. Esta disipación histerética se consigue gracias al comportamiento elastoplástico del plomo y a su rápida cristalización, que permite que la descarga tras la plastificación se produzca de forma elástica, formando un ciclo de histéresis teórico como el que se muestra en la Figura 3(a). En dicha figura, K_e representa la rigidez elástica del aislador, que se suele tomar igual a la del plomo, y que en este proyecto presenta el valor $K_e \approx 12 K_p$ (obtenido mediante ensayos de prototipo); K_p representa la rigidez post-elástica del aislador, que se suele tomar como la elástica aportada por el elastómero, ya que el plomo plastifica al llegar a su carga de fluencia y deja de contribuir significativamente; K_{eff} es la rigidez efectiva

“lineal” hasta el desplazamiento de respuesta, d , y E_D es la energía disipada en un ciclo completo de deformación.

La Figura 3(b) representa el diagrama histerético de dos aisladores de un mismo tramo continuo del puente. A pesar de ser aisladores idénticos, su respuesta es distinta porque no depende sólo de las características de los mismos, sino también de su subestructura, y hay

encepados notablemente más rígidos, como son los de junta. Por otro lado, la Figura 3(d) representa el diagrama histerético del sistema completo, que es el que se utiliza para calcular la disipación total de energía, y en donde $K_{e,es}$ y $K_{p,es}$ son la suma en paralelo de todas las sumas en serie de las rigideces K_e o K_p de los aisladores, con las elásticas de su subestructura correspondiente, según el esquema de la Figura 3(c).

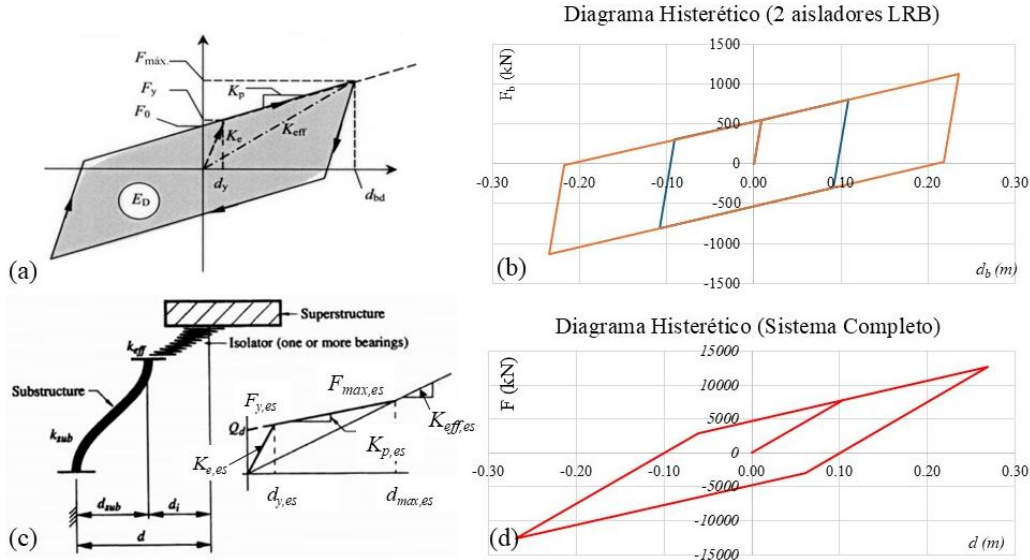


Figura 3. Diagramas histeréticos de los aisladores y la estructura (Fuentes: (a) EN-1998-2; (c) AASHTO) [4]).

La energía disipada E_D se calcula tomando el área encerrada dentro del ciclo de histéresis, mediante la expresión (1). La normativa propone considerar esta disipación en el cálculo como de tipo viscoso equivalente, proporcionando la fracción de amortiguamiento efectivo de la estructura completa, $\xi_{eff,es}$, en la expresión (2). A continuación, se obtiene el coeficiente $B \geq 1$ de AASHTO [4] con la expresión (3), que se utiliza para dividir las ordenadas espectrales del espectro de proyecto (Figura 2) para reducirlo en el rango de periodos superiores a $0.8 T_{eff}$. T_{eff} es el periodo efectivo de un sistema de 1 grado de libertad equivalente, según la expresión (4), a partir de $K_{eff,es}$ y de la masa movilizada, M_{eff} , que para el caso del Biobío se corresponde con la total del tablero y entre 15 y 20 % de la de la subestructura no enterrada, ya que los encepados

son muy masivos. La Figura 4 muestra cómo queda el espectro reducido.

$$E_D = 4(F_{y,es} \cdot d_{max,es} - F_{max,es} \cdot d_{y,es}) \quad (1)$$

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

$$B = \left(\xi_{eff} / 0,05 \right)^{0,4} \quad (3)$$

$$T_{eff} = 2\pi \sqrt{M / K_{eff,es}} \quad (4)$$

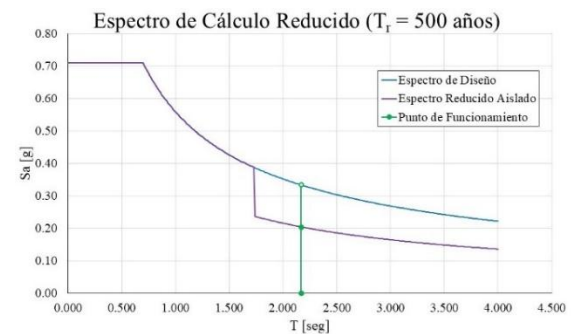


Figura 4. Espectro de respuesta reducido para el DBE “con socavación”.

La respuesta sísmica con este tipo de aisladores es no lineal, ya que los desplazamientos y la energía disipada dependerán de la respuesta en la gráfica bilineal que representa el sistema de aislamiento ($K_{e,es}$ y $K_{p,es}$) frente a la solicitación sísmica representada por el espectro reducido, que a su vez depende del desplazamiento, que era condición de partida. Por tanto, la única forma de resolver la respuesta por métodos lineales modales espectrales es iterando, partiendo de unas condiciones estimadas del aislador: F_y , d_y , K_e y K_p .

1. Se parte de un valor tentativo de $d_{max,es}$ y se calcula $K_{eff,es}$, $F_{max,es}$.
2. Se obtiene T_{eff} , E_D , $\xi_{eff,es}$ y B .
3. Se reduce el espectro y se calcula la respuesta con propiedades $K_{eff,es}$. Se obtiene el nuevo valor de $d_{max,es}$. Si difiere en más de un 5 % respecto del de inicio, se vuelve a iterar con este nuevo valor hasta converger.

Una vez obtenida la respuesta, se deben realizar las comprobaciones normativas de los propios dispositivos, relativas a: limitación de deformaciones tangenciales ante el DBE; estabilidad frente al pandeo del aislador bajo el MCE; y garantizar un óptimo comportamiento frente a las acciones horizontales de servicio (viento y frenado).

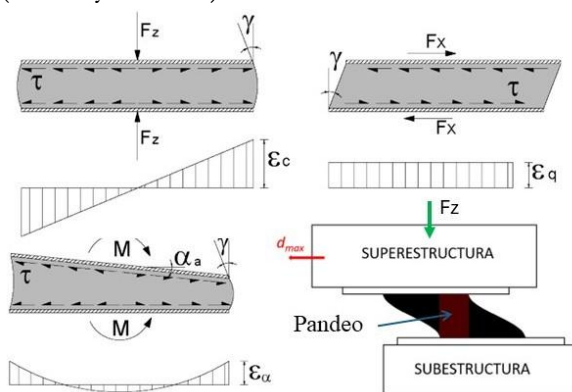


Figura 5. Comprobaciones del aislador (Fuente: DGC. Serie Guías Eurocódigo [9]).

Cuando la respuesta sísmica converge, si los resultados no son satisfactorios, bien porque la reducción de esfuerzos en la subestructura es insuficiente, bien porque los desplazamientos resultantes son excesivos, o bien porque no se

cumplen los requisitos normativos de los propios dispositivos, entonces se redimensionan los aisladores y se repite el cálculo. Para ello, según el tipo de resultado obtenido, habrá que modificar la planta del aislador, el espesor de elastómero, el módulo de rigidez transversal dinámico del elastómero (G) o el diámetro del núcleo de plomo.

Se desarrollaron tres tipos de aisladores para responder a las singularidades particulares que se suceden en los diferentes tramos de los 1.8 km de puente, todos ellos de planta cuadrada por economía de espacio para alojar las mesetas de apoyo. La Figura 6 muestra el detalle de alzado del aislador tipo T1.

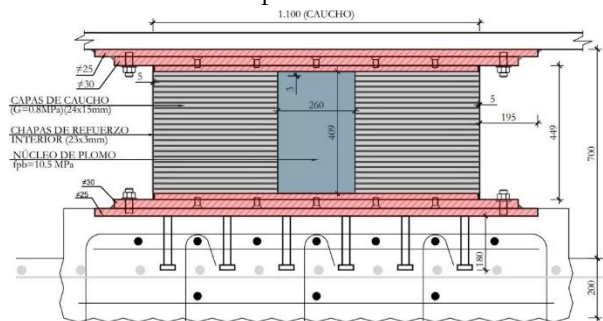


Figura 6. Alzado de aislador T1.

Se describen a continuación los tres tipos de aisladores, todos ellos con $G = 0.8$ MPa, definiéndolos como $A \times B \times H(T_q - D_p)$, siendo $A \times B$ las dimensiones en planta, H la altura total, T_q el espesor total de elastómero y D_p el diámetro del plomo.

- Aislador T1: 1100x1100x469(360-260)
- Aislador T2: 1100x1100x377(280-240)
- Aislador T3: 1200x1200x468(324-260)

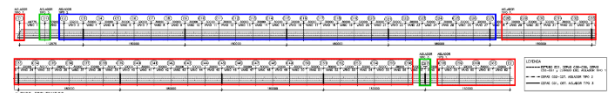


Figura 7. Alzado con el emplazamiento de los aisladores (T1 = rojo; T2 = azul; T3 = verde).

4. Proceso de dimensionamiento

El procedimiento de cálculo iterativo descrito en el apartado 3 se puede realizar mediante dos métodos: el método basado en el modo

fundamental, que es aplicable si el puente exhibe un comportamiento muy marcado por los modos fundamentales, para lo cual se requiere una cierta regularidad en planta y en alzado; o el método espectral multimodal, para casos más singulares.

Dado que el puente Biobío presenta una gran irregularidad en alzado en toda su longitud, y además la subestructura en las zonas de junta recibe solicitaciones sísmicas independientes de dos tramos, resultó evidente que se debía resolver por el método multimodal (apartado 4.2). Sin embargo, para predimensionar los aisladores, y de cara también a tener una cierta sensibilidad de la respuesta esperable en los mismos, se decidió comenzar desarrollando el método del modo fundamental (apartado 4.1).

Por último, a petición de la Propiedad (EFE), se realizó una validación de los métodos anteriores mediante un cálculo dinámico directo en el dominio del tiempo (apartado 4.3).

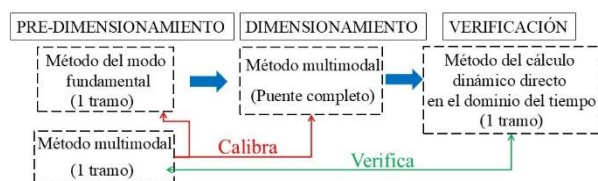


Figura 8. Esquema de proceso de proyecto.

Los aisladores y la respuesta estructural se han calculado, en todos sus procedimientos, para la hipótesis “con socavación” y “sin socavación”, para el DBE y el MCE, así como para las direcciones sísmicas longitudinal (X) y transversal (Y). La respuesta direccional se ha combinado mediante la regla del 30 % para obtener el desplazamiento de cálculo de AASHTO [4]. Se ha comprobado también que el sismo de componente vertical no descomprime los aisladores.

4.1. Predimensionamiento con el método espectral basado en el modo fundamental

Este método considera que toda la respuesta de la estructura se produce para el primer modo de vibración en cada dirección principal. Esta

asunción es cierta cuando la estructura moviliza más del 90 % de su masa en ese primer modo. La respuesta se obtiene de forma iterativa, según el procedimiento explicado en el apartado 3.

En el puente Biobío no se puede aplicar el método del modo fundamental para el dimensionamiento, ya que los diferentes tramos continuos, pese a estar vinculados con los adyacentes por medio de los encepados de junta, no comparten tablero y por tanto el puente no se puede considerar un diafragma rígido, que es una condición necesaria para que una estructura responda según un único modo. Sin embargo, este método sí que resultó útil para el predimensionamiento de los aisladores. Mediante el análisis de dos tramos tipo del puente por separado, se obtuvieron unos resultados razonablemente próximos a los del método multimodal, salvo en algunos puntos singulares. Un ejemplo de estos resultados, para los aisladores T1, son los que se muestran en las Figura 3 y Figura 4.

Adicionalmente, se generó un modelo numérico de un solo tramo continuo al que se aplicó el método multimodal. De esta forma, se pudo estimar la masa efectiva necesaria para calcular el periodo efectivo, T_{eff} , de la expresión (4). Es decir, esto permitió calibrar cuánta masa de los encepados, adicional a la del tablero, contribuye en los primeros modos, para poder tenerlo en cuenta, tanto en el predimensionamiento basado en el modo fundamental, como en el dimensionamiento definitivo basado en el método multimodal del puente completo.

4.2. Dimensionamiento con el método espectral multimodal aplicado al puente completo

Se ha utilizado el modelo global de la estructura (ver Figura 9) para realizar el cálculo multimodal, modelando los aisladores como muelles de rigidez lateral K_{eff} (ver Figura 3(a)) correspondiente a cada aislador. Este valor es el

resultado de un proceso iterativo similar al explicado en el apartado 3. Para el caso del puente de Biobío la particularidad es que, al haber juntas entre tramos continuos de tablero, pero compartiendo la subestructura los dos tramos adyacentes, no se puede calcular el amortiguamiento a partir del desplazamiento del tablero ($d_{max,es}$) y del cortante basal ($F_{max,es}$), sino que hay que calcularlo iterando para cada uno de los subsistemas de aisladores + subestructura, obteniendo la energía que disipan y sumándolas ($E_{D,es} = \sum E_{Dais+subes,i}$) para, a continuación, reducir el espectro. Esta circunstancia hace más complejo el proceso iterativo porque hay que converger en los d_{max} propios de cada aislador.

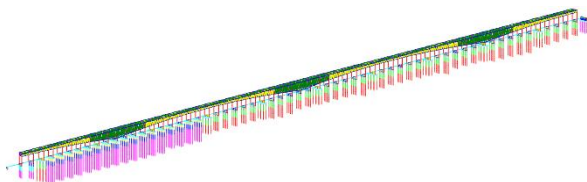


Figura 9. Modelo global del puente Biobío.

Este análisis ha permitido ajustar las propiedades de los aisladores anteriormente predimensionados y detectar los apoyos que requieren un aislador particular, como el T3, porque sean puntos de concentración de reacciones (e.g. aisladores sobre una subestructura de junta, con menor tramo libre de pilotes sobre suelo socavado y terreno más competente).

En la Figura 10 se representan los espectros reducidos de dimensionamiento, para cada dirección sísmica, tras la última iteración.

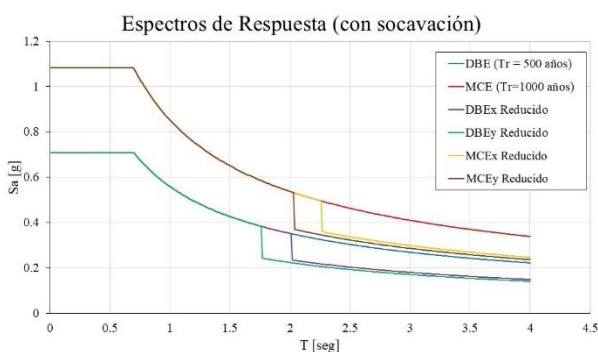


Figura 10. Espectros de respuesta de proyecto y reducido para el DBE y MCE “con socavación”.

En la Tabla 1 se muestra la respuesta del puente en términos de periodo efectivo (T_{eff}), amortiguamiento viscoso equivalente del sistema ($\xi_{eff,es}$) y desplazamientos máximos en aisladores ($d_{máx}$), para los casos “con socavación” (CS) y “sin socavación” (SS). Nótese que la disipación es más efectiva en el caso SS porque la subestructura es más rígida por coacción del suelo. Por otro lado, la fracción de amortiguamiento es menor bajo el MCE porque, para un mismo aislador, los ciclos histeréticos son más esbeltos, puesto que el aislador se deforma más.

Tabla 1. Resultados del análisis multimodal.

Nivel	Caso	T_{eff} (s)	$\xi_{eff,es}$	$d_{máx}$ (mm)
DBE	CS	2,52	16%	375
DBE	CS	2,22	20%	311
DBE	SS	1,91	27%	210
DBE	SS	1,69	29%	230
MCE	CS	2,85	12%	633
MCE	CS	2,49	14%	555
MCE	SS	2,16	19%	410
MCE	SS	2,10	20%	450

4.3. Validación con el método de cálculo dinámico directo en el dominio del tiempo

A instancias de la Propiedad, se ha desarrollado un cálculo dinámico en el dominio del tiempo con objeto de validar los resultados de los métodos modales espectrales de los apartados anteriores. Para ello, se han modelado los aisladores como muelles no lineales con las propiedades de rigidez K_e y K_p correspondientes.

A continuación, se han seleccionado tres acelerogramas históricos de la región de Biobío, que se muestran en la Figura 11, que se han tratado y escalado para las condiciones de proyecto: registros en Constitución y Hualañé del terremoto de Maule (2010) de 8.8 ° de magnitud momento (M_w), y registro en Llolleo del terremoto de Algarrobo (1985) de 8 ° de magnitud.

La Figura 12 representa los espectros de respuesta de $\xi = 5\%$ correspondientes a los

terremotos elegidos, que se comparan con los de proyecto. Se aprecia que, en el entorno de los periodos de respuesta de la estructura, los terremotos elegidos varían sensiblemente respecto de los de proyecto, razón por la cual se han escalado con factores para el MCE entre 0,6 y 2,9, según el terremoto y la dirección del mismo considerada.

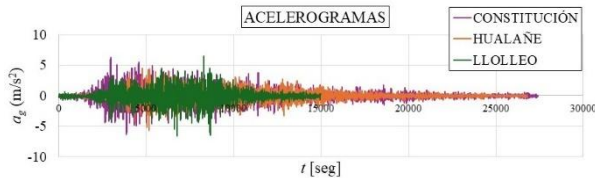


Figura 11. Acelerogramas utilizados en la validación.

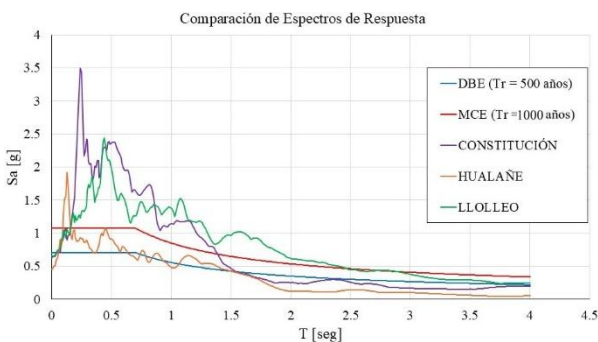


Figura 12. Espectros de respuesta de terremotos y proyecto.

El análisis dinámico directo se realiza con el tramo que se utilizó en el apartado 4.1 para el análisis con el método basado en el modo fundamental y con el que se calibró la masa efectiva mediante el método multimodal. Se verifica que la respuesta en fuerzas y desplazamientos para el MCE es inferior a la obtenida utilizando el método multimodal, con lo que esta metodología queda validada. En la Figura 13 se muestran un ejemplo de los ciclos histeréticos de uno de los aisladores frente al registro de Constitución, que alcanza valores de desplazamiento máximo de 220 mm.

Conviene destacar que la solicitud de validación con el método de cálculo dinámico directo en el dominio del tiempo, por parte de la Propiedad, tiene perfecto sentido, ya que los métodos modales espectrales asumen, mediante la expresión (2), que el amortiguamiento histerético, que depende del desplazamiento (por plastificaciones), puede tomarse como

equivalente a un amortiguamiento viscoso que depende de la velocidad, lo cual carece de fundamento físico. En general suele dar resultados aceptables, pero cuando las deformaciones plásticas son muy elevadas, como ocurre en los aisladores LRB, puede empezar a no ser una suposición muy afortunada, si bien, no ha sido el caso. Para este proyecto concreto, se demostró que el cálculo con los métodos modales iterativos eran conservadores.

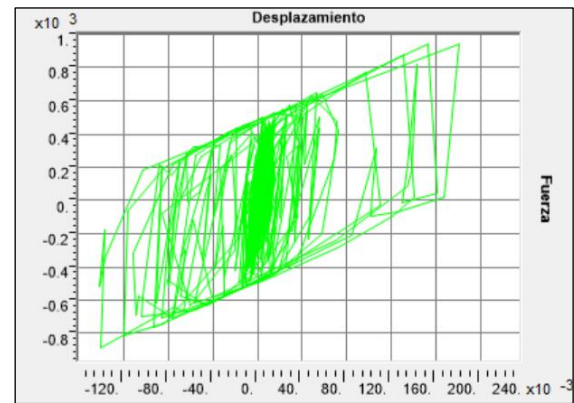


Figura 13. Respuesta dinámica de un aislador.

5. Fabricación y ensayos

Para la verificación de desempeño de los aisladores LRB, el proyecto incluye las condiciones y valores de ensayo de prototipo y de calidad que debe garantizar el fabricante. Tanto la fabricación de los aisladores como los ensayos de prototipo y de calidad ha sido realizados en Italia.



Figura 14. Aislador terminado y ensayado.

Los ensayos de prototipo buscan probar que los aisladores que se van a fabricar cumplen con los requerimientos de proyecto, y deben

realizarse en dos aisladores de cada tipo. Se prescriben, según AASHTO [4]:

- Ensayo cuasi-estático muy lento (0.33 mm/min) de térmico: frente a acciones lentas, el aislador debe responder según la rigidez elástica del elastómero, ya que el plomo no trabaja bajo una carga sostenida.
- Ensayo cuasi-estático rápido, de viento y frenado: frente a la acción rápida, el aislador debe responder con la rigidez elástica del plomo frente a deformaciones bajas.
- Ensayo sísmico cíclico a 0.4 Hz, hasta el desplazamiento de 1.25 veces el del DBE. Los valores de K_{eff} y ξ_{eff} del ensayo deben coincidir con los de proyecto, con desviaciones de $\pm 10\%$ y $\pm 15\%$ respectivamente (Figura 16).
- Se repite el ensayo cuasi-estático rápido para evaluar viento y frenado tras un sismo.
- Se repite el ensayo sísmico cíclico para verificar que las propiedades del aislador no decaen tras el primer sismo y que puede resistir réplicas en condiciones óptimas.
- Ensayo sísmico cuasi-estático hasta el desplazamiento del MCE, para garantizar que el aislador es estable y puede resistir en Estado Límite de Proximidad al Colapso (Figura 17). La Figura 15 muestra un prototipo de aislador T1 sometido a este ensayo.



Figura 15. Ensayo de prototipo T1 de MCE hasta desplazamiento $d_{max} = 633$ mm.

Los ensayos de calidad se realizan en todos los aisladores producidos, según AASHTO [4], e

incluyen pruebas de capacidad vertical máxima y de deformación lateral sísmica hasta el DBE.

Los ensayos han sido retransmitidos en directo para la supervisión de todos los agentes del proyecto y obra. Así mismo, MC2 ha asistido presencialmente a los ensayos de prototipo.

5.1. Resultado de los ensayos

Los ensayos han demostrado una gran correlación con los valores estimados y prescritos en proyecto. Especialmente, se ha logrado reproducir con muy buena precisión la rigidez efectiva, K_{eff} , prescrita para los ensayos sísmicos. El amortiguamiento efectivo (ξ_{eff}) medido en ensayos ha sido un 6 % superior al prescrito, lo que es favorable. La razón de esta desviación es que la formulación de cálculo normativa estima el ξ_{eff} teniendo en cuenta sólo la plastificación del plomo (la energía disipada ED es el área del paralelogramo de la Figura 3(a)).

Sin embargo, la realidad es que el elastómero es un material viscoelástico que también disipa, en torno a un 6 % (según el Eurocódigo 8), por amortiguamiento viscoso dependiente de la velocidad. Esto se detecta en el abombamiento de las curvas de la gráfica del ensayo cíclico sísmico de los aisladores T1 frente al DBE, que se muestra en la Figura 16, en donde también se aprecia buena estabilidad de los bucles frente al *scragging* (pérdida de rigidez en ciclos sucesivos).

6. Conclusiones

Se ha desarrollado el proyecto de un puente ferroviario de gran longitud y subestructura singular en una zona de alta sismicidad, para el cual se ha planteado un sistema de aislamiento sísmico con capacidad de disipación de energía. Este planteamiento ha permitido reducir los esfuerzos en la subestructura en torno a un 20 % respecto a versiones anteriores del proyecto en las que el tablero se apoyaba en apoyos

elastoméricos convencionales, reduciendo también, de forma cuantiosa, el número de apoyos a disponer. Además, mediante el aislamiento, se garantiza el cumplimiento del Estado Límite de Proximidad al Colapso frente al nivel de sismo máximo posible (MCE).

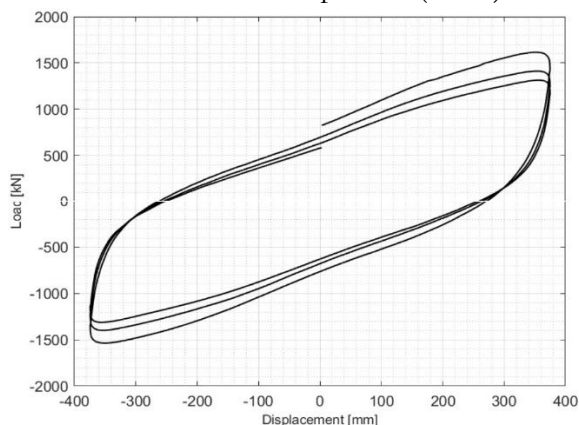


Figura 16. Histéresis del aislador prototipo de T1 del DEB hasta $d_{max} = 375$ mm.

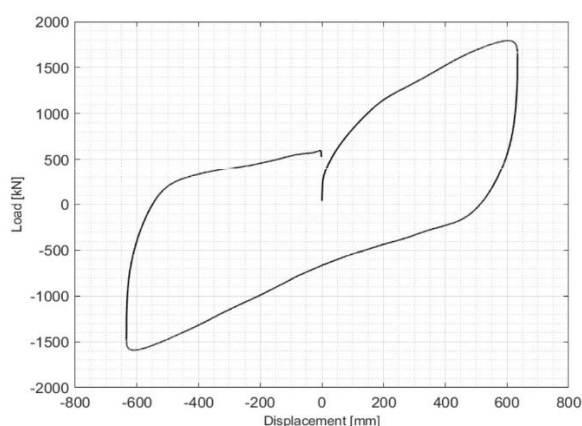


Figura 17. Histéresis del aislador prototipo de T1 del MCB hasta $d_{max} = 633$ mm.

Agradecimientos

El proyecto ha sido promovido por EFE Ferrocarriles de Chile.

Desde MC2 Estudio de Ingeniería, queríamos dar las gracias al equipo de SACYR, por la confianza recibida en todas las fases de redacción del proyecto y asistencia a la obra, encabezado por Hristo Iliev Hristev (Jefe de Obra), Rafael Batista Terrones (Jefe de Oficina Técnica de Obra), Silvio Bonatti (Gerente del contrato), Rafael Guillén Carmona (Jefe Estructuras Obra Civil Central) y Cristian Bernal Pérez (Estructuras Obra Civil Central).

Al equipo de OPH Ingenieros Consultores, coautores junto con MC2 del proyecto modificado y de la asistencia a obra, encabezado por Óscar Paredes y Camilo Aguirre.

A la colaboración, supervisión y asesoramiento facilitado por parte de IEC encabezado por Tomás Guendelman y Mario Guendelman.

Referencias

- [1] M. Rupérez et al. Diseño nuevo puente de ferrocarril sobre el río Biobío en la ciudad de Concepción, Chile. IX Congreso de ACHE, Granada 2025.
- [2] H. Iliev et al. Ejecución Puente de Ferrocarril sobre el río Biobío en Concepción (Chile). IX Congreso de ACHE, Granada 2025.
- [3] Dirección de Vialidad, Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile. Manual de Carreteras Volumen N°3 – Chile.
- [4] AASHTO. Guide Specifications for Seismic Isolation Design, 2014.
- [5] EQCO. Complemento al Estudio de Amenaza Sísmica del Puente Biobío, 2022.
- [6] Skinner R.I., Kelly T.E., Robinson W.H. Seismic isolation for designers and structural engineers, 2011.
- [7] Kelly J.M. Earthquake-Resistant Design with Rubber, 2nd Edition. Springer-Verlag, London, 1997.
- [8] DGC. Guía para el Proyecto sísmico de puentes de Carretera, 2019.
- [9] DGC. Guía para el cálculo de aisladores elastoméricos de bajo amortiguamiento en zona sísmica, 2025.
- [10] Pascual. J. Criterios de proyecto para el empleo de aparatos de apoyo de neopreno zunchado con núcleo de plomo en zonas sísmicas, 1996.