

DISEÑO DE AISLADORES SISMICOS DE GOMA NATURAL Y NUCLEO DE PLOMO PARA VIADUCTOS DE RUTA RP34 CORDOBA ARGENTINA

José A. Inaudi^{a,b}, Carlos Gerbaudo^{a,c}, Guillermo Gerbaudo^{a,c} y Diego Sampó^c

^aFacultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Av. Vélez Sarsfield 1611, 5000 Córdoba, Argentina, <http://www.efn.uncor.edu.ar>

^bFacultad de Ingeniería, Universidad Católica de Córdoba, Av. Armada Argentina 3555, Córdoba, Argentina, <https://ucc.edu.ar>

^cINGROUP, Consultora en Ingeniería, Av. Nores Martinez 2863, 5016 Córdoba, Argentina
<https://ingroup-op.com.ar/>

Palabras clave: Puentes, viaductos, aislamiento sísmico, diseño estructural sismorresistente

Resumen. Los sistemas de aislamiento sísmico en puentes y viaductos se utilizan para lograr una reducción en la demanda de deformaciones y esfuerzos en pilas, estribos y fundaciones mediante la concentración de deformaciones en los aisladores flexibles para escenarios sísmicos, efectos de retracción, fluencia lenta y variaciones térmicas de tableros continuos. En este trabajo se describe el diseño del sistema de aislamiento de cuatro viaductos diseñados para la Ruta Provincial N° 34 que conecta la ciudad de Córdoba con el Valle de Traslasierra en Argentina. Se describen los objetivos y criterios de diseño, las características de los dispositivos diseñados y la modelación computacional. Se evalúa el desempeño sísmico esperado de los viaductos analizando modelos lineales equivalentes simplificados y mediante simulación computacional de modelos no lineales con sismos compatibles con el espectro de pseudo-aceleraciones de diseño. Se presentan además algunos resultados de pruebas experimentales de los dispositivos y aspectos constructivos relevantes.

Keywords: Bridges, Viaducts, Seismic Isolation, Structural Design.

Abstract. Seismic isolation systems in bridges and viaducts provide deformation and stress reduction of piers, abutments and foundations allowing significant lateral deformations of seismic isolators during seismic events, retraction and relaxation, and thermal expansion in continuum girders. In this paper, we describe the design of a lead rubber bearing system for four viaducts of Ruta Provincial N° 34 that connects the city of Córdoba with Traslasierra Valley in Argentina. We focus on design criteria, mechanical characteristics of isolation devices and computational models used for design. The seismic performance of the viaducts is estimated using computer simulation of non-linear models subjected to design-spectrum compatible ground motions. We present some experimental results of tested seismic isolators and relevant construction aspects of the viaducts related to the isolation system.

1 INTRODUCCIÓN

En este trabajo se describe el diseño del sistema de aislamiento de cuatro viaductos diseñados, y actualmente en construcción, para un tramo de cruce de las Sierras Chicas de la Ruta Provincial N° 34 que conecta la ciudad de Córdoba con el Valle de Traslasierra. Los cuatro viaductos presentan tramos curvos y rectos, cuyas longitudes totales varían entre 120 m y 245 m, con vanos de luces parciales comprendidas entre 40 m y 45 m y pilas con alturas de 10 m a 60 m. En la Figura 1 se muestra una sección longitudinal del Viaducto 1. La estructura típica del tablero está constituida por cinco vigas pretensadas de sección tipo “U” prefabricadas, de eje recto, y montadas mediante una viga de lanzamiento metálica, con una losa superior compuesta por prelosas estructurales y una capa de hormigón de segunda etapa, completándose el tablero con dos vigas transversales en sus extremos. Los tableros de los viaductos tienen peraltes que varían del 2% al 6%, y pendientes longitudinales que varían entre 0.7% y 2.6%. Los tramos de tablero están vinculados a nivel de losa mediante losas de continuidad en correspondencia con las pilas, y cuentan con juntas de dilatación en ambos estribos. Al ser el tablero continuo, resulta muy importante la consideración de movimientos lentos producidos por retracción y fluencia lenta de vigas prefabricadas del tablero del puente. Los efectos de los acortamientos del tablero sobre las pilas y estribos son controlados por la flexibilidad de los aisladores sísmicos que toman una parte significativa de estas deformaciones.

Las pilas se diseñaron con un fuste de sección hueca y con fundación superficial mediante una base rectangular. Una viga dintel en el extremo superior de cada pila soporta las vigas principales del tablero. Los aisladores sísmicos se ubican entre viga dintel y tablero, uno bajo cada extremo de viga prefabricada.

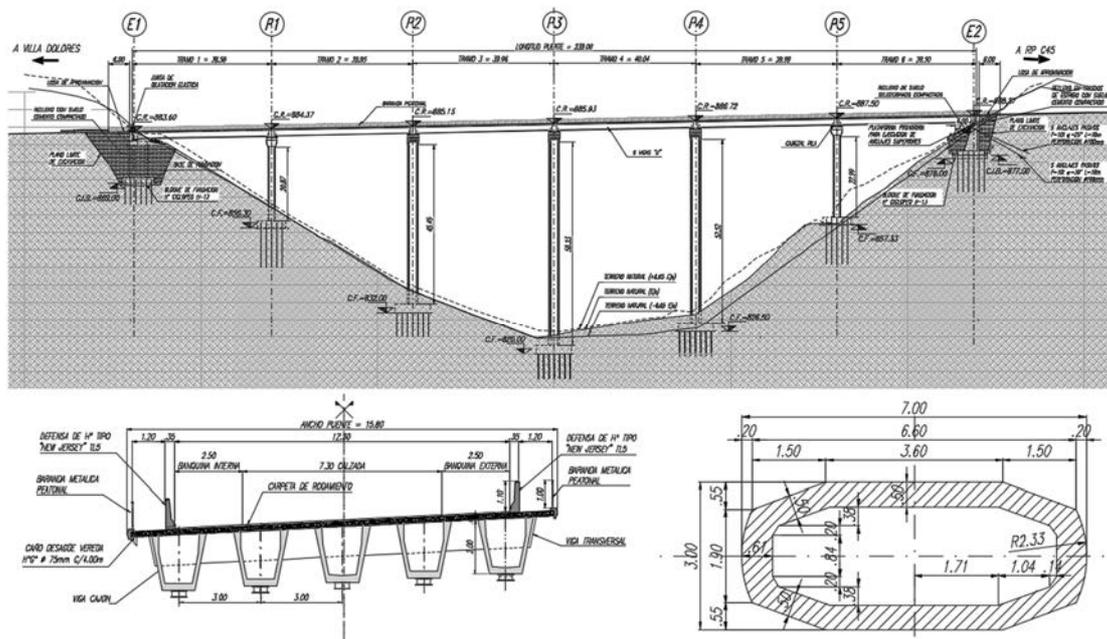


Figura 1. Sección longitudinal del Viaducto 1 (arriba) – Sección transversal típica de tablero (izquierda) – Sección transversal de pilas P2 – P3 – P4 (derecha)

En las siguientes secciones se describen los principales aspectos del proceso de diseño del sistema de aislamiento, la geometría de los dispositivos diseñados y la modelación computacional desarrollada para el análisis. Se evalúa el desempeño sísmico esperado de los viaductos analizando modelos lineales equivalentes y mediante simulación de modelos no lineales que incluyen el comportamiento elastoplástico de los dispositivos con sismos

compatibles con el espectro de pseudo-aceleraciones de diseño. Se presentan además algunos resultados de pruebas experimentales de los dispositivos y aspectos constructivos relevantes.

2 AISLAMIENTO SÍSMICO EN PUENTES

El uso de aislamiento sísmico en estructuras cuya funcionalidad durante y después de un evento sísmico es crítica ha tenido un fuerte crecimiento en el mundo durante las últimas décadas. Estos sistemas de protección sísmica de gran flexibilidad lateral y capacidad de disipación de energía se colocan para mejorar el desempeño en términos de reducción de cortes basales, momentos de vuelco, aceleraciones en la superestructura y reducción de daño estructural y no estructural (Skinner et al. 1993; Kelly, 1997). Si bien existen varios sistemas de aislamiento sísmico, los más utilizados son los aisladores de goma con o sin núcleo de plomo, los aisladores sísmicos de neopreno de alto amortiguamiento, los aisladores de péndulo de fricción y aisladores deslizantes combinados con aisladores sísmicos.

En el caso de puentes y viaductos, los sistemas de aislamiento se introducen entre la infraestructura y la superestructura para lograr una reducción de demanda de deformaciones y esfuerzos sobre pilas, estribos y fundaciones mediante un incremento del periodo natural y la concentración de deformaciones en los aisladores flexibles. En el diseño convencional de puentes con apoyos de neopreno armado convencionales, formados por capas de neopreno y chapas interiores de acero vulcanizados en caliente, es necesario disponer de llaves de corte o topes antisísmicos ya que los apoyos de neopreno tienen una limitada capacidad de deformación al corte, y son típicamente diseñados para las cargas de servicio (movimientos lentos por fluencia y retracción, deformaciones por variación térmica y deformaciones impuestas por la sobrecarga de uso). Estos apoyos no son diseñados para las cargas sísmicas, y en caso de ocurrencia de sismo, se admite la falla del aparato de apoyo por lo que se colocan topes de contacto longitudinales y transversales para evitar el colapso del tablero. En el diseño de puentes con un sistema de aislamiento sísmico, en cambio, no se requieren topes sísmicos, ya que el diseño de los aisladores sísmicos y sus elementos de conexión al tablero y a la infraestructura se diseñan para la condición de Sismo Máximo Probable (MCE: *Maximum Credible Earthquake*), es decir, los apoyos tienen capacidad de soportar las deformaciones y fuerzas de origen sísmico y transferir dichas fuerzas a la infraestructura por medio de sus conexiones diseñadas para tal fin.

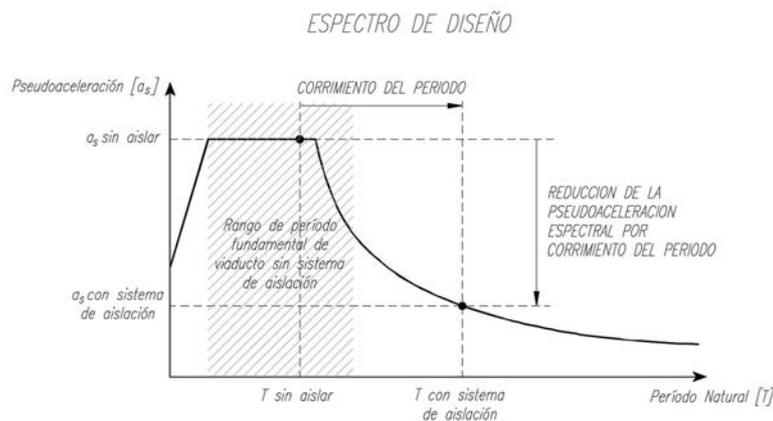


Figura 2. Efecto de alargamiento del periodo fundamental en el espectro de pseudo-aceleraciones del viaducto.

La incorporación de los aisladores sísmicos alarga los periodos de vibración natural de los primeros tres modos de vibración de un viaducto, reduciendo los cortantes basales totales por el efecto de corrimiento hacia zonas de menor intensidad del espectro de pseudo-aceleraciones,

como ilustra la Figura 2 (De la Llera et al. 1998). Esto permite, en condiciones de respuesta sísmica, concentrar una parte significativa del desplazamiento relativo al suelo del tablero en los aisladores cuya componente elastomérica soporta deformaciones de corte y cargas verticales simultáneas sin daño. Como ilustra conceptualmente la Figura 3, mientras que en un diseño convencional de puente los desplazamientos horizontales del tablero constituyen la demanda de deformación sobre la pila en un modo de vibración transversal (o longitudinal), en un diseño con aislamiento sísmico el sistema de aislamiento toma una porción significativa del desplazamiento horizontal del tablero, particularmente en estribos y pilas de baja altura.

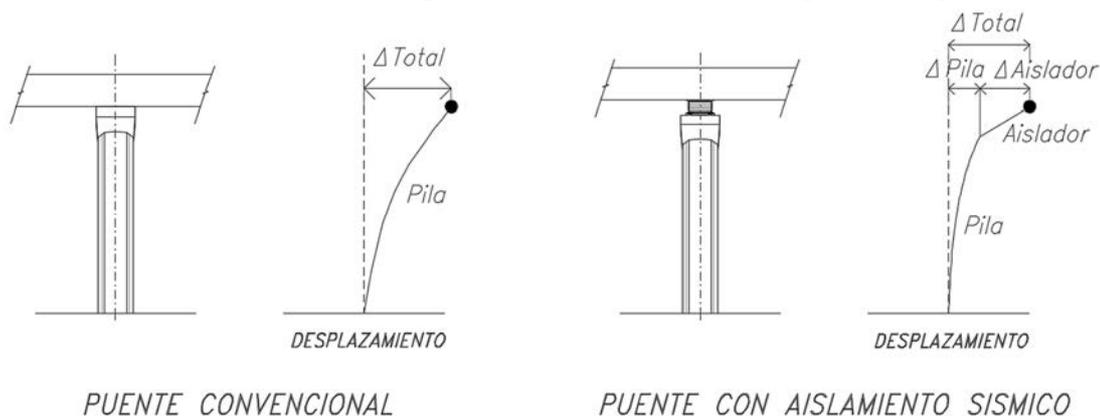


Figura 3. Diferencia de comportamiento en modo de vibración transversal o longitudinal de puente convencional y puente con aislamiento sísmico

3 DISEÑO DEL AISLAMIENTO SÍSMICO

En esta sección se describen los objetivos de diseño, las normas aplicadas, el espectro de pseudo-aceleraciones y los factores de reducción por ductilidad y amortiguamiento utilizados para el diseño del sistema de aislamiento sísmico. Finalmente, se describe el sistema de aislamiento adoptado.

3.1 Objetivos de diseño

Los sistemas de aislamiento sísmico de los viaductos se diseñaron considerando los siguientes objetivos:

- Eliminar juntas intermedias en el puente, desarrollando un tablero continuo.
- Reducir solicitaciones de vuelco en fundaciones para reducir su tamaño y permitir sistemas superficiales de fundación de pilas para reducir tiempo y costo de obra mediante aumento del período natural y aumento del amortiguamiento modal equivalente.
- Garantizar funcionalidad del puente post-sismo y niveles de daño mínimo en sismos de mediana y alta intensidad. Reducir a un mínimo el daño sísmico esperado para intensidad de sismo de diseño de manera que el puente mantenga la funcionalidad y no requiera intervención/reparación en tablero, pilas ni estribos, con excepción del eventual reemplazo de las juntas de dilatación.
- Controlar los niveles de demanda de esfuerzos horizontales en estribos y a la vez utilizar la capacidad resistente disponible de éstos para evitar períodos naturales demasiado largos en viaductos de pilas esbeltas. Controlar los esfuerzos de extracción longitudinal y transversal de los estribos en la dirección longitudinal del tablero en el sentido hacia el interior del puente por las limitaciones impuestas por el emplazamiento y buscando

evitar el uso de refuerzos (anclajes en roca) de los estribos en este viaducto y a la vez utilizar la capacidad resistente lateral disponible en estribos en escenarios sísmicos.

- Controlar demanda de momento en pilas de distinta altura, buscando mantener la sección transversal del fuste de las columnas, permitiendo el reuso de moldes de hormigonado.
- Reducir el volumen de hormigón y acero requerido en pilas y fundación mediante la reducción de demanda de esfuerzos sísmicos en base de pilas.
- Permitir retracción, fluencia lenta y expansión térmica en tableros sin juntas sin producir deformaciones significativas en pilas.
- Garantizar rigidez y capacidad adecuadas para cargas laterales de servicio (viento, tránsito, etc.).
- No interferir significativamente en el proceso constructivo tradicional de los viaductos.

3.2 Normas y recomendaciones para el diseño

Para la verificación del diseño del viaducto se utilizaron las siguientes normas: INPRES-CIRSOC 103 (2013), Argentina; CIRSOC 201 (2005), Argentina; AASHTO Guide Specification for Seismic Isolation Design (2010) y AASHTO LRFD Bridge Design Specifications (2017) de la American Association of State Highway and Transportation Officials.

3.3 Espectro de pseudo-aceleraciones

Teniendo en cuenta que el espectro del sismo de diseño del evento de $M = 5.9$ desarrollado en el estudio de riesgo sísmico para este proyecto presenta una caída muy pronunciada para períodos naturales mayores que 0.15 s en comparación con el espectro de la norma INPRES CIRSOC 103, y que para reducir la demanda de esfuerzos sobre el puente se propone llevar al periodo fundamental del viaducto a valores entre 1.5 s y 2.3 s con aislamiento sísmico, se utilizó para los análisis el espectro de la norma INPRES CIRSOC 103 2013 modificado en el ancho de la zona de pseudo-aceleración constante del espectro de la Zona 1 para suelo Tipo I, llevando el comienzo hasta $T_1 = 0.075$ s. En base a estas consideraciones se adoptó el siguiente espectro de diseño sísmico:

$$S_a = a_s + \frac{T}{T_1}(b - a_s) \quad T < T_1 \quad (1)$$

$$S_a = b \quad T_1 < T < T_2 \quad (2)$$

$$S_a = b (T_2/T)^{2/3} \quad T > T_2 \quad (3)$$

con los siguientes parámetros: $T_1 = 0.075$ s, $T_2 = 0.60$ s, $a_s = 0.08$, y $b = 0.24$. El espectro de diseño se multiplicó por un factor de importancia o riesgo (Grupo A de la norma) $\gamma_r = 1.3$ para considerar la condición de diseño de Sismo Máximo Probable.

3.4 Factor de reducción por amortiguamiento

En el análisis modal espectral se utilizó un factor de reducción por amortiguamiento para la estimación del espectro de pseudo-aceleraciones de modelos lineales, para el cálculo de esfuerzos elásticos F_E y deformaciones elásticas para el sismo de diseño utilizando el concepto de amortiguamiento modal efectivo o equivalente β aportado por los núcleos de plomo. Para esto, se siguieron los lineamientos de la revisión 2010 de la AASHTO Guide Specification for Seismic Isolation Design (de la American Association of State Highway and Transportation Officials) que sugiere el siguiente factor de reducción por amortiguamiento efectivo para uso

en análisis modal espectral:

$$B = (\beta/0.05)^{0.3} \quad (4)$$

Generalmente la aplicación de este factor se limita a valores de amortiguamiento efectivo $\beta < 0.30$, lo que corresponde a un $B = 1.7$.

3.5 Factor de reducción por ductilidad

El factor de reducción espectral por ductilidad y sobrerresistencia permite definir los esfuerzos de diseño de la estructura dúctil a partir de los esfuerzos elásticos como

$$F_D = F_E/R \quad (5)$$

El factor R contempla dos efectos: la sobrerresistencia y la ductilidad. Tomando en cuenta la categoría de la vía de comunicación donde se ubica este viaducto, para el diseño por capacidad de esta estructura mediante superposición modal espectral se utiliza un valor de $R = 1.5$ para las pilas y $R = 1.0$ para aisladores, estribos y fundaciones.

La sobrerresistencia mencionada tiene en cuenta el desarrollo de resistencias superiores a las nominales durante el proceso de plastificación como consecuencia de fenómenos tales como las variaciones entre la tensión de fluencia especificada del acero y la tensión de fluencia real, el endurecimiento por deformación del acero y el aumento de resistencia por el confinamiento del hormigón, entre otros. De acuerdo a la bibliografía especializada y al reglamento INPRES CIRSOC 103, el valor de la sobrerresistencia considerado es de 1.4 por lo que, en función del valor de R adoptado para pilas, la ductilidad requerida es del orden de 1.0, es decir, el comportamiento de la estructura será esencialmente elástico.

La definición de los valores de R adoptados apunta al eventual desarrollo de plasticidad en las pilas sin falla de aisladores ni en fundación: para el sismo máximo de diseño no se esperan incursiones significativas en el campo inelástico y para un sismo mayor, se tiene en cuenta una potencial incursión en el campo inelástico en las pilas, protegiendo el sistema de fundación.

3.6 Sistema de aislamiento adoptado

Para proveer las funcionalidades indicadas, se diseñó un sistema de aislamiento con aisladores de goma natural con núcleo de plomo (ANP). Cada viga prefabricada se montó sobre dos ANP, uno en cada extremo, fijados con conexión resistente a momento al dintel de la pila y a la viga prefabricada. La vinculación del aislador a la viga prefabricada se materializó mediante pernos y manguitos roscados embebidos en la viga de hormigón. Una vez montada la viga sobre las pilas o estribos, se procede a soldar la placa inferior del aislador en una placa metálica embebida en la viga dintel colocada para tal fin, lo que permite simplificar el proceso constructivo y mejorar la tolerancia geométrica que requiere una unión con pernos. Debido a la pendiente longitudinal de las vigas principales, se materializaron cuñas en los extremos de las vigas correspondientes a los sectores de colocación de los apoyos para mantener la verticalidad de los aisladores en su posición final. En este diseño se optó por ANPs de sección circular privilegiando funcionalidades y costo. La flexibilidad lateral de los aisladores combinada con alta rigidez vertical se logra mediante el uso de dispositivos compuestos por capas horizontales de elastómero con placas metálicas de acero intercaladas soldadas al elastómero que aumentan significativamente la rigidez vertical del dispositivo sin afectar su flexibilidad horizontal aportada por deformación de corte en las capas de elastómero. En los aisladores con núcleo de plomo, las placas de elastómero confinadas por placas de acero entregan alta flexibilidad lateral y el núcleo incorpora niveles de disipación de energía significativos que permiten elevar la razón de amortiguamiento crítica efectiva del puente a valores del orden del 20% o aún mayores, con la consecuente reducción de demanda de

deformaciones y esfuerzos en la estructura y fundaciones. Los núcleos de plomo entregan además rigidez y resistencia lateral en bajas deformaciones, lo que permite controlar deformaciones debidas a cargas de servicio de tránsito y cargas de viento.

A la izquierda de la Figura 4 se muestra el diseño resultante de un tipo de aislador elastomérico con núcleo de plomo utilizado en los viaductos. A la derecha de la figura se muestran los resultados de ensayos experimentales realizados sobre dicho aislador mediante la aplicación de una carga axial y deformaciones de corte siguiendo los protocolos experimentales de la norma AASHTO 2010. Se observa la rigidez tangente post fluencia aportada por el elastómero y el ciclo de histéresis aportado por disipación plástica del núcleo de plomo. La reducción del área del ciclo de histéresis que se observa en la figura se debe a efectos de la temperatura en el núcleo de plomo (Ioannis V. Kalpakidis y Michael C. Constantinou). Dependiendo de los niveles de deformación del aislador, la frecuencia de vibración del viaducto y masa modal del modo considerado, el ciclo de histéresis de los aisladores con núcleo de plomo produce un aumento de la razón de amortiguamiento modal de la estructura, lo que tiene como consecuencia una reducción de la pseudo-aceleración, deformaciones y esfuerzos sísmicos sobre las pilas para una apropiada selección de la fuerza de fluencia del núcleo.

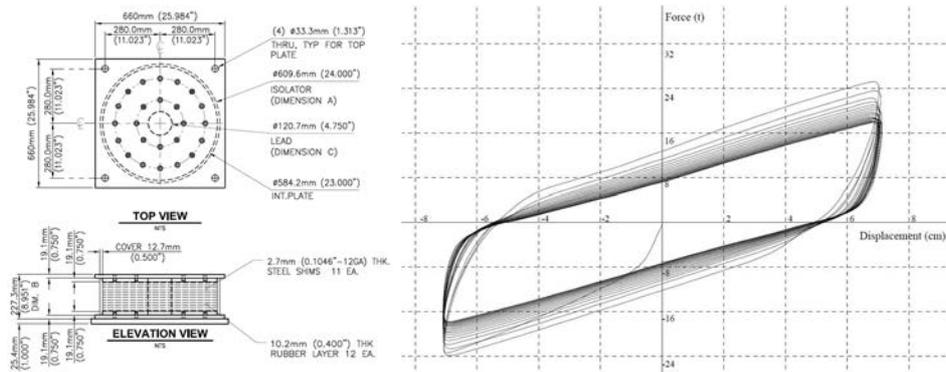


Figura 4. Diseño del aislador con núcleo de plomo (izquierda) - Resultado de ensayos experimentales (derecha)

En la Figura 5 se muestra la distribución en planta de los dispositivos de apoyo resultantes del diseño de protección sísmica del Viaducto 1. En la Tabla 1 se detallan las características geométricas (del aislador y sus capas de goma) y mecánicas para deformación de diseño.

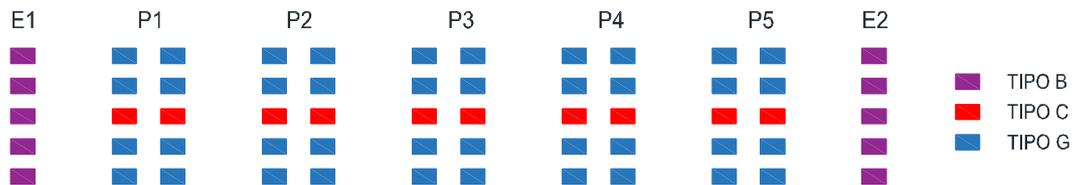


Figura 5. Distribución en planta de los aisladores del Viaducto 1

Tipo	Altura total	Diámetro	Nº capas	Espesor capa	Rigidez efectiva	Núcleo de plomo	Energía disipada
	H [mm]	D [mm]	n	e [mm]	k_{eff} [t/m]	Fy [t]	EDC [tm]
B	234.7	609.6	10	12.2	356	16.4	7.6
C	278.6	520.7	16	10.2	96	1.8	0.6
G	158.8	457.2	5	12.7	243	1.8	0.7

Tabla 1. Características principales de los aisladores tipo B, C y G

Al concentrar una porción significativa de las deformaciones horizontales del tablero

relativas a la fundación en los aisladores, el diseño permite la adopción de una losa continua de 240 m de largo sin juntas intermedias, aprovechando la rigidez horizontal del tablero para distribuir adecuadamente la demanda sísmica en pilas y estribos. Calibrando adecuadamente las rigideces laterales de los aisladores elastoméricos y las capacidades en fluencia de los núcleos de plomo se logra uniformizar en cierta medida los momentos de vuelco a los que están sometidas las pilas, lográndose así una uniformización en la geometría de las secciones transversales de columnas, con la consecuente disminución de costos en moldes de encofrados y sistemas constructivos. Paralelamente, esto permite aprovechar la rigidez que aportan los estribos del viaducto, transfiriendo un porcentaje del corte sísmico hacia estos elementos sin superar la capacidad geotécnica de arranque de la ladera sobre la que se apoyan, descargando las pilas y por lo tanto, reduciendo su momento de vuelco y el tamaño de sus fundaciones.

4 METODOS DE ANALISIS Y MODELACION NUMERICA

En el diseño de los viaductos y del sistema de protección sísmica se utilizaron los siguientes métodos de análisis y modelos cuya complejidad es función de los requerimientos en cada etapa de análisis y diseño:

- Análisis simplificado con un modo para definición preliminar de parámetros del sistema de aislamiento y estimación de desplazamientos sísmicos en juntas.
- Análisis modal espectral con rigidez y amortiguamiento efectivo.
- Análisis dinámico por integración numérica del modelo no lineal con señales sintéticas compatibles con el espectro en el que se incluyen las no linealidades de los ANP.

4.1 Modelo simplificado

Un primer modelo simplificado de tablero recto como cuerpo rígido sin peralte ni pendiente longitudinal utilizando propiedades de rigidez y amortiguamiento efectivo, se utilizó para obtener un diseño preliminar de la rigidez lateral de aisladores sísmicos y diseño de capacidades de los núcleos de plomo de manera que los primeros dos periodos naturales de vibración fueran del orden de 1.5 a 2.3 segundos para vibración transversal y longitudinal de manera de lograr una reducción significativa en los momentos flectores en las pilas y demanda sobre las fundaciones de las pilas y estribos. Este modelo permitió además una estimación del orden de magnitud del amortiguamiento modal equivalente aportado por los núcleos de plomo.

4.2 Modelo de vigas 3D elástico para análisis sísmico con rigideces efectivas

Se generó un modelo de vigas desarrollado en SAP® en el que se representan los tableros, pilas y estribos mediante elementos finitos tipo viga. Este modelo incorpora la flexibilidad del tablero mediante la modelación de las 5 vigas longitudinales elásticas conectadas con elementos transversales que representan el efecto de la losa del tablero, incorpora el peralte de la sección transversal, la curvatura en planta del tablero, la ubicación y dimensiones de las pilas y estribos y la rigidez rotacional de las fundaciones en las tres direcciones. La interacción suelo estructura se modela mediante resortes elásticos lineales distribuidos en la extensión de la base, cuyas constantes se determinan en función de las características geométricas de la base y las propiedades mecánicas de la roca de emplazamiento. Los aisladores de las pilas y estribos se modelan como elementos elásticos con rigidez lateral, al giro y axial en paralelo con elementos elasto-plásticos que modelan los núcleos de plomo en los casos que corresponda. En este caso, a los elementos correspondientes a los núcleos de plomo se les asigna una rigidez efectiva estimada para la condición extrema correspondiente a un evento sísmico. En la Figura 6 se puede observar la geometría del modelo numérico del Viaducto 1. Este modelo fue utilizado

para verificar el diseño del viaducto según normas.

A partir de lo expuesto anteriormente, se realiza un análisis modal espectral con el objeto de determinar los siguientes aspectos:

- Determinación de la demanda sísmica en elementos estructurales del viaducto.
- Determinación de características dinámicas tales como períodos del viaducto para condiciones sísmicas.
- Determinación de esfuerzos y deformaciones de la estructura.

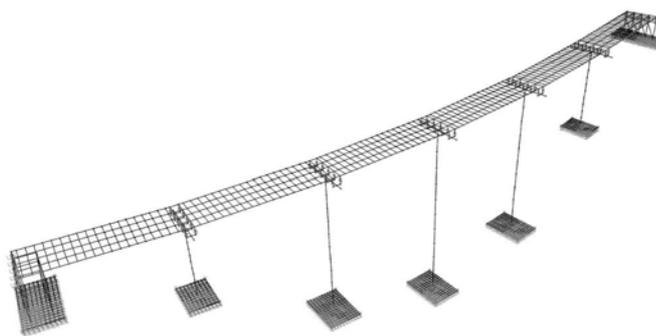


Figura 6. Geometría del modelo numérico del Viaducto 1

4.3 Modelo de vigas 3D elástico con rigideces equivalentes para escenarios de servicio

Se creó además un modelo de vigas de similares características a las del modelo utilizado para el análisis modal espectral, con la utilización de rigideces equivalentes para los elementos correspondientes a los núcleos de plomo en bajas deformaciones, con el objeto de estimar el comportamiento de la estructura en escenarios en los que se presentan pequeñas deformaciones. Con este modelo se abordaron los siguientes aspectos:

- Estimación de respuesta estática para peso propio, sobrecarga, viento, fuerzas centrípetas, fuerzas de frenado, y todos los escenarios de carga correspondientes al puente en servicio.
- Determinación de las deformaciones para los escenarios de servicio.
- Análisis de modos y frecuencia naturales para pequeñas deformaciones (escenarios de servicio).

4.4 Modelo de vigas 3D con aisladores sísmicos no lineales

Se desarrolló un modelo de vigas y elementos elastoplásticos para los ANP para estimar el desempeño sísmico del viaducto. La demanda de deformaciones y esfuerzos se estimó mediante integración numérica de las ecuaciones de movimiento del modelo sometido a señales sintéticas de aceleración de suelo compatibles con el espectro de diseño. El tablero y las pilas se modelaron en rango lineal dado que para el sismo de diseño no se espera incursión inelástica significativa en pilas, estribos, tablero o fundaciones, tal como se indica en el apartado 3.5.

Se generaron señales artificiales como muestras de un proceso aleatorio cuyo valor medio de pseudo-aceleración es compatible con el espectro de diseño para aceleraciones impuestas laterales y verticales simultáneas. El espectro de pseudo-aceleraciones de una de las señales compatibles con el espectro se ilustra en la Figura 7 junto con el espectro de diseño correspondiente. Las señales generadas se utilizan para simulación en el dominio del tiempo del modelo lineal y no lineal del viaducto como aceleraciones en direcciones ortogonales modificadas con los factores estándares de combinación.

Este modelo se utiliza para la evaluación de los siguientes aspectos:

- Validación del comportamiento esperado del sistema de protección sísmica (demanda de deformaciones de los ANP).
- Evaluación más precisa de las deformaciones del viaducto para eventos sísmicos, ya que las estimaciones de deformaciones en el modelo modal espectral pueden resultar poco precisas por el efecto de la utilización de rigideces efectivas en los núcleos de plomo y razones de amortiguamiento modal equivalentes.

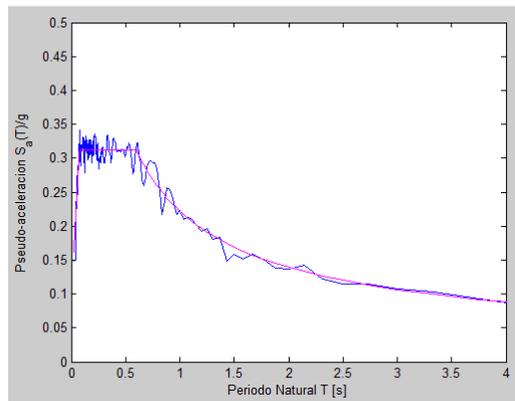


Figura 7. Espectro lineal de acelerograma sintético compatible con el espectro de diseño.

5 RESULTADOS DE MODELOS DE ANALISIS

En esta sección se presentan algunos resultados de los análisis desarrollados durante el diseño. Por razones de espacio se presentan solamente resultados del viaducto 1.

5.1 Períodos naturales para escenarios de servicio y extremos del Viaducto 1

Debido al comportamiento no lineal de los núcleos de plomo, la respuesta de la estructura será diferente según se vea sometida a cargas de servicio o acciones sísmicas. En condiciones de servicio, es decir, para cargas que generan deformaciones en los núcleos de plomo menores a su deformación de fluencia, el núcleo de plomo aporta una componente de rigidez importante al sistema estructural, lo que se traduce en períodos naturales más bajos del viaducto y un mayor control de deformaciones para acciones de este tipo.

Viaducto	Período	Modelo	
		Servicio	Extremo
1	T_{Long} [s]	1.49	2.52
	T_{Transv} [s]	2.16	2.50
2	T_{Long} [s]	1.15	1.99
	T_{Transv} [s]	1.28	1.95
3	T_{Long} [s]	1.59	2.28
	T_{Transv} [s]	2.07	2.46
4	T_{Long} [s]	1.13	1.93
	T_{Transv} [s]	1.44	1.90

Tabla 2. Valores de períodos naturales de los viaductos para escenarios de servicio y extremos

Para escenarios sísmicos, las deformaciones en el núcleo de plomo superan su deformación de fluencia, por lo que la rigidez efectiva que aporta este elemento al conjunto disminuye notablemente, lo que se traduce en un aumento del período con la consecuente disminución de

la demanda de esfuerzo cortante sísmico. En la Tabla 2 se pueden observar los valores de períodos para los modos de traslación de tablero longitudinal y transversal, para escenarios de servicio y escenarios extremos.

5.2 Deformaciones para estados de servicio y sismo

En la Tabla 3 se muestran los valores máximos de deformación del tablero para los estados de carga de viento, movimientos lentos y sismo, respectivamente. Los valores correspondientes a los estados de viento y movimientos lentos se obtuvieron del modelo descrito en el punto 4.3 y los valores correspondientes al caso sísmico se obtuvieron del modelo descrito en el punto 4.4.

Estado	Dirección	E1	P1	P2	P3	P4	P5	E2
Viento	u_{Transv} [m]	0.006	0.018	0.029	0.033	0.030	0.021	0.007
Mov. Lentos	u_{Long} [m]	0.083	0.054	0.026	0.001	0.028	0.054	0.082
Sismo Long. + 0.3 Sismo Transv	u_{Long} [m]	0.110	0.110	0.109	0.107	0.104	0.100	0.097
	u_{Transv} [m]	0.013	0.033	0.047	0.052	0.047	0.042	0.036

Tabla 3. Deformaciones del tablero del Viaducto 1 en pilas y estribos

5.3 Validación de resultados del modelo modal espectral con el modelo no lineal

Con la finalidad de validar los resultados del análisis modal espectral utilizado en el diseño, se comparan sus resultados con los del modelo numérico no lineal. En la Tabla 4 se presentan los valores de momentos en el empotramiento de las columnas de las pilas del Viaducto 1 obtenidos para el modelo con análisis modal espectral afectados por el factor de reducción por amortiguamiento y los valores obtenidos por simulación en el tiempo del modelo no lineal.

Pila	Modelo	
	Modal Espectral	No Lineal
	M_{transv} [tm]	M_{transv} [tm]
P1	2814	2480
P2	5631	5075
P3	7947	7521
P4	5707	4956
P5	2402	2080

Tabla 4. Valores de momento de empotramiento de columna para modelo modal espectral y no lineal

6 CONCLUSIONES Y NUEVA LINEA DE INVESTIGACION

La adopción del sistema de aislación sísmica mediante aisladores con núcleo de plomo ha permitido cumplimentar los objetivos planteados para el diseño de los viaductos, resultando un diseño estructural adecuado en cuanto a funcionalidad y costos. Al concentrar la deformación en los aisladores, se pudo adoptar un tablero sin juntas, aprovechando la rigidez horizontal de dicho elemento para lograr una adecuada distribución de esfuerzos en pilas y estribos, reduciendo y uniformizando las dimensiones de estos elementos estructurales y limitando las fuerzas de arranque de la ladera.

Los núcleos de plomo aportan un importante nivel de disipación de energía, aumentando la razón de amortiguamiento crítico modal efectivo de la estructura, lo que permite reducir los niveles de demanda sísmica. Los períodos naturales para los escenarios de servicio disminuyen significativamente gracias a la rigidez de los núcleos de plomo en bajas deformaciones,

lográndose así un mayor control de las deformaciones para el estado de servicio. Esto resalta las virtudes del sistema de aislamiento sísmico adoptado, que por su simplicidad constructiva y mínimo mantenimiento garantiza un adecuado funcionamiento tanto en escenarios de servicio como en escenarios sísmicos.

El sistema de aislamiento sísmico protege las pilas, evitando incursiones significativas en el rango plástico, lo que garantiza la funcionalidad de la estructura post sismo y reduce la probabilidad de daño estructural y su reparación, destacándose que el costo de inversión inicial de los aisladores sísmicos es del orden del 5% del costo total de la estructura del viaducto sin incluir el costo del movimiento de suelo.

Durante el desarrollo del proyecto se consideró la posibilidad de utilizar combinaciones de aisladores sísmicos con doble sujeción y apoyos de neopreno de alta flexibilidad con sujeción en un extremo y conexión por fricción en el otro, o apoyos elastoméricos con transmisión de corte por fricción o conexiones tipo *dowell* (llave de corte) que permitieran reducción de costos y simplificación constructiva para viaductos en zona de baja sismicidad. Dado que las normas de diseño sismorresistente de puentes no promueven el uso de este tipo de apoyos se descartó su aplicación, quedando como línea de trabajo de investigación el estudio teórico y experimental de este tipo de combinación de dispositivos para viaductos y puentes en zonas de baja sismicidad.

REFERENCIAS

De la Llera, J.C., Inaudi, J. A.y Luders, C., *SIRVE: Análisis y Diseño de Sistemas de Aislamiento Sísmico y Disipación de Energía*, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago de Chile,1998.

Kelly, J.M y Konstantinidis, D.A., *Mechanics of Rubber Bearings for Seismic and Vibration Isolation*, John Wiley & Sons, Ltd, 2011.

Kelly, J.M, *Earthquake-Resistant Design with Rubber*, Springer Verlag, 1993.

Skinner, R.I, Robinson, W.H., McVerry, G.H., *An introduction to seismic isolation*, John Wiley, 1993.

INTI-CIRSOC, *INPRES-CIRSOC 103*, 2013

INTI-CIRSOC, *CIRSOC 201*, 2005

AASHTO, *Guide Specification for Seismic Isolation Design*, 2010

Ioannis V. Kalpakidis y Michael C. Constantinou, *Effects of Heating on the Behavior of Lead-Rubber Bearings. I: Theory*, 2009

CSI SAP2000, *Analysis Reference Manual Computer and Structures*, 2011