



DISEÑO DE VIADUCTOS DE GRAN ALTURA CON AISLACIÓN SÍSMICA

Carlos F. Gerbaudo ^{1,2}	José A. Inaudi ¹	Guillermo M. Gerbaudo ^{1,2}	Mauricio Destéfánis ²
M.Sc. Ingeniero Civil	Dr. Ingeniero Civil	Dr. Ingeniero Civil	Ingeniero Civil
FCEFyN - U.N.C.	FCEFyN - U.N.C.	FCEFyN - U.N.C.	INGROUP SRL
cgerbaudo@unc.edu.ar	inaudijose@gmail.com	ggerbaudo@unc.edu.ar	ingroup@ingroup-op.com.ar

RESUMEN

En este trabajo se describe el diseño estructural integral de cuatro viaductos de gran altura que fueron proyectados en el “Camino Altas Cumbres”, Ruta Provincial N° 34, que conecta la ciudad de Córdoba con el Valle de Traslasierra en Argentina. Este proyecto incluye un sistema de aislamiento sísmico que se utiliza 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, y para estados de servicio originados por los efectos de retracción, fluencia lenta y variaciones térmicas de tableros continuos. Se describen los objetivos y criterios de diseño, las características estructurales de los viaductos, los dispositivos de aislación sísmica diseñados y la modelación numérica desarrollada para el análisis estructural. 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 resultados de las pruebas experimentales de los dispositivos y mediciones del comportamiento dinámico de los viaductos que se realizaron en obra.

ABSTRACT

In this paper, we describe the design of four high viaducts of “Camino Altas Cumbres”, Ruta Provincial N° 34, that connects the city of Córdoba with Traslasierra Valley in Argentina. This project applies seismic isolation system to provide deformation and stress reduction of piers, abutments and foundations allowing significant lateral deformations of seismic isolators during seismic events, and service states caused by retraction, creep, and thermal expansion in continuous deck. We focus on design criteria, description of structural system of viaducts, 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 performance aspects of the viaducts related to the dynamic tests in situ.



INTRODUCCIÓN

En este trabajo se describe el diseño estructural integral de cuatro viaductos de gran altura que fueron proyectados en el “Camino Altas Cumbres”, Ruta Provincial N° 34, que conecta la ciudad de Córdoba con el Valle de Traslasierra en Argentina.

El proyecto consiste en el diseño estructural integral de cuatro (4) viaductos de gran altura que incluyen un sistema de aislación sísmica compuesto por dispositivos de apoyo de goma natural armada con núcleos de plomo, que fueron utilizados por primera vez en Argentina para estructuras de puentes en zona sísmica.

El sistema de aislación sísmica tiene por objeto 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, y control de vibraciones y deformaciones para los estados de servicio originados por las cargas móviles de tránsito, frenado, viento, efectos de retracción y fluencia del hormigón y variaciones térmicas actuantes en tableros continuos.

Los tableros de los viaductos de 40 a 45 m de luz parcial, consisten en un sistema de múltiples vigas pretensadas en banco de sección tipo “U” de hasta 120 t de peso cada una, que fueron montadas con un sistema de viga de lanzamiento reticulada metálica, autodeslizante y con control de movimientos totalmente automatizado, con una losa superior formado por prelosas estructurales y una capa de hormigón armado in situ.



Figura 1. Vista general de los Viaductos Carreteros de las Altas Cumbres



Los cuatro (4) Viaductos Carreteros proyectados presentan las siguientes características:

Viaducto Carretero Nº 1: Planta curva de 239 m de longitud total, compuesto por seis (6) tramos de aproximadamente 40 m de luz parcial cada uno.

Viaducto Carretero Nº 2: Planta recta de 120 m de longitud total, compuesto por tres (3) tramos de 40 m de luz parcial cada uno.

Viaducto Carretero Nº 3: Planta curva de 245 m de longitud total, compuesto por un (1) tramo inicial de 45 m de luz parcial, y cinco (5) tramos de 40 m de luz parcial cada uno.

Viaducto Carretero Nº 4: Planta curva de 160 m de longitud total, compuesto por cuatro tramos de 40 m de luz parcial cada uno.

En la Figura 1 se presenta una vista general de los viaductos carreteros del Camino de las Altas Cumbres en la Provincia de Córdoba.

DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA ESTRUCTURAL

El sistema estructural adoptado por los viaductos de Altas Cumbres, es el resultado de un proceso de diseño que tiene especialmente en cuenta el entorno de la obra, los condicionantes funcionales y estructurales, el método constructivo y la elección de un sistema de aislación sísmica compuesto por dispositivos de goma natural armada con chapas de acero y un núcleo de plomo.

Una vez seleccionado el método constructivo mediante el montaje de vigas con una viga de lanzamiento metálica auto deslizante, quedaron definidas las capacidades de los equipos e instalaciones para la fabricación, transporte y montaje de las vigas principales del tablero, y la composición estructural de los viaductos se configuró con tramos de tablero de 40 a 45 m de luz parcial, simplemente apoyados, vinculados a nivel de tablero mediante losas de continuidad en correspondencia con las pilas, y con juntas de dilatación extremas en ambos estribos, provistos con un sistema de aislación sísmica.

Los estribos del tipo cerrado, fueron diseñados con una estructura espacial formada por contrafuertes, un muro de cierre frontal y una viga superior que sirve de apoyo a las vigas principales del tablero, con anclajes horizontales al macizo de fundación.

Las pilas de los viaductos presentan una configuración geométrica de monocolumna de sección cajón hueca, con una viga dintel superior, de sección "T" invertida, que se utilizó durante el método constructivo para apoyar las patas de la viga de lanzamiento, y en servicio para el apoyo de las vigas principales del tablero.

Las fundaciones en general se realizaron mediante bases superficiales apoyadas sobre el macizo rocoso, con anclajes de confinamiento, y en el caso particular de la Pila 1 del Viaducto 3 fue necesario recurrir a una fundación con pilotes vinculados por un cabezal.

En la Figura 2 se puede observar el perfil longitudinal del Viaducto 1, donde se observan los estribos anclados al macizo rocoso, las pilas de gran altura y el tablero de vigas.

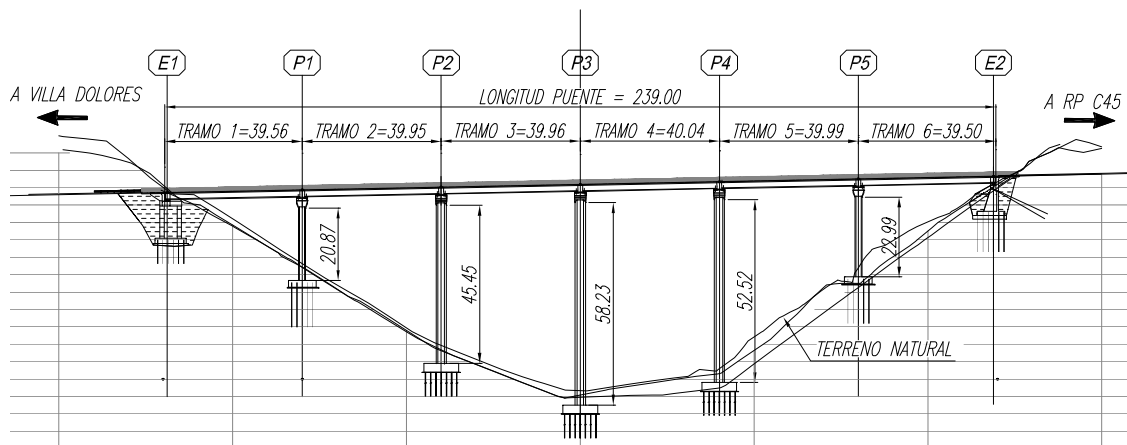


Figura 2. Perfil Longitudinal del Viaducto 1

Descripción del tablero

La sección transversal del tablero tiene un ancho total de 15.80 m, compuesto por una calzada central de 7.30 m, banquina externa e interna de 2.50 m de ancho, defensas de hormigón tipo New Jersey correspondiente al nivel de seguridad TL-5 y dos veredas laterales de 1.20 m de ancho para circulación peatonal, protegida con una baranda metálica montada sobre un cordón externo. Se colocaron cenefas prefabricadas en el borde externo de las veredas que junto con el diseño especial de las barandas con parantes curvos y bastidores de líneas horizontales permitió conformar un perfil del tablero con un alto valor estético.

Es importante destacar que en función del peralte variable de la calzada que surge del proyecto vial de cada viaducto, se resolvió geoméricamente la pendiente transversal de cada tablero mediante la altura variable de los apoyos de las vigas, y con un recrecimiento de una de las almas de las vigas de forma de materializar el peralte del proyecto vial para cada tramo de viaducto.

La estructura típica del tablero está constituida por cinco (5) vigas pretensadas de sección tipo "U", de 2.00 m de altura media, con una losa superior de 0.20 m de espesor mínimo, compuesta por prelosas estructurales de 0.05 m de espesor y 0.15 m de hormigón de segunda etapa, completándose el tablero con dos (2) vigas transversales extremas de hormigón armado.

En la Figura 3 se puede observar la sección transversal de un tablero típico de los viaductos.

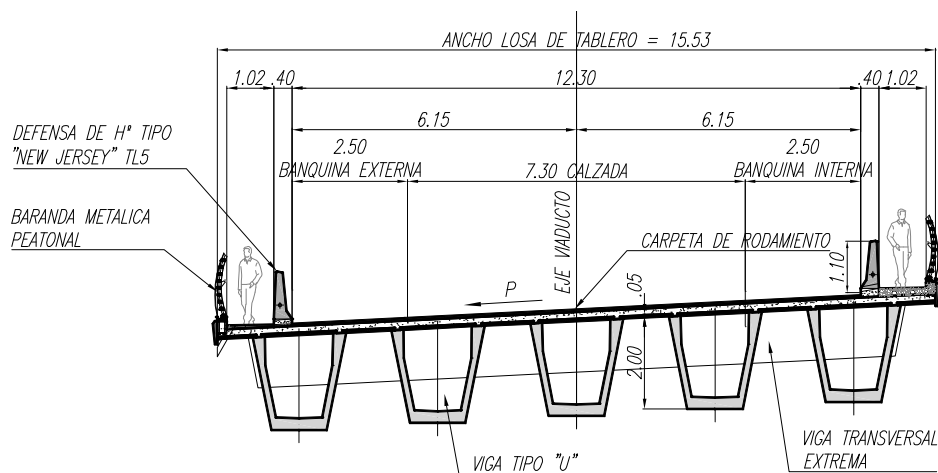


Figura 3. Sección transversal del tablero típico de los viaductos

Descripción de las pilas de gran altura

El diseño de las pilas se desarrolló a partir de criterios estructurales, tales como la definición de secciones con una determinada capacidad resistente y rigidez en ambas direcciones principales del viaducto, aspectos constructivos, tales como la elección de un sistema de encofrado trepador para el fuste y un sistema de encofrado modular auto portante para la viga dintel, criterios funcionales de geometría y espacios necesarios en la viga dintel para apoyo de la viga de lanzamiento, y criterios estéticos con el objeto de generar una estructura con pilas relativamente esbeltas para los viaductos insertos en el contexto de las sierras de Córdoba, lo que derivó en la elección de pilas con configuración estructural de monocolumna de sección cajón hueca, con una viga dintel superior de altura variable que sirve de apoyo a las vigas del tablero.

Las pilas de los viaductos se ejecutaron con dos tipos diferentes de secciones huecas en función de la altura de cada pila, y la altura máxima de las pilas alcanzó los 60 m de altura en la Pila 3 del Viaducto 1. La fundación de las pilas es del tipo superficial apoyada sobre el macizo rocoso, previéndose la colocación de anclajes de confinamiento en la roca, salvo la Pila 1 del Viaducto 3 que se proyectó con una fundación de pilotes debido a las características del perfil geotécnico correspondiente a su emplazamiento. En la Figura 4 se presenta una imagen de la Pila 1 del Viaducto 3 en la etapa constructiva de ejecución de la viga dintel.



Figura 4. Vista general de las pilas de gran altura del Viaducto 1

DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA CONSTRUCTIVO

Tal como se mencionó, el diseño de los viaductos está íntimamente ligado a la definición del sistema y método constructivo. A continuación, se describen las partes principales del sistema constructivo adoptado en los Viaductos de Altas Cumbres.

Fabricación de vigas pretensadas

Se previó la instalación de una planta de producción de vigas de hormigón premoldeado y pretensado en un taller instalado en el propio obrador, con un sector de producción de armaduras y un banco de pretensado de 1200 t de capacidad de tiro, único en Argentina, para realizar el pretensado de las vigas tipo “U” del tablero mediante el sistema de cordones rectos anclados por adherencia directa.

El banco de pretensado está constituido por un cabezal extremo fijo formado por un bloque prismático de hormigón armado con dos fosas donde se empotran las ménsulas metálicas que sirven de apoyo a la viga y donde se anclan individualmente los



cordones, un cabezal extremo móvil similar al anterior, provisto de cuatro gatos hidráulicos de destesado que realizan la transferencia gradual del pretensado a la pieza, y la viga de vinculación de sección T equilibrada con un par de tensores de acero de alta resistencia que constituyen la estructura de reacción entre los dos cabezales. Se colocaron pilotes de tracción al terreno para controlar la estabilidad de la viga de reacción del banco. En la Figura 5 se muestra una imagen del cabezal móvil del banco de pretensado.



Figura 5. Vista del cabezal móvil del banco de pretensado de 1200 t de capacidad

Una vez que el hormigón ha alcanzado una resistencia suficiente mediante el curado a vapor de 30 MPa, se realizó el destesado gradual de los cordones mediante el cierre de los gatos hidráulicos que se ubican en el cabezal móvil, finalmente se realizó el corte de los cordones y el sellado de los extremos de la viga mediante mortero cementicio.

La fábrica de premoldeo contaba con una línea de producción de las vigas pretensadas que estaba constituida por dos pórtico grúa de 75 t de capacidad cada uno que se desplazaban en forma paralela al eje del banco, que permitía izar las vigas desde el banco hasta la playa de acopio, y en la misma operación u otra subsiguiente, izar y cargar la viga sobre un vehículo especialmente diseñado para transportar las piezas prefabricadas hasta su posición en el tramo n-1 del tablero del viaducto, para la próxima etapa de montaje del tablero.

También se diseñaron los moldes metálicos de las vigas con una estructura de perfiles de acero y chapa metálica que constituye la bandeja o fondo del encofrado de la viga, y los laterales del molde también constituidos por perfiles y chapas con rigidizadores, con un sistema de apertura lateral que permitía desmoldar rápidamente la pieza para su izado y transporte.

Finalmente, se instaló un sistema de curado a vapor compuesto por una caldera, sus respectivas cañerías de conducción de vapor, y una estructura liviana que permitirá montar una carpa para lograr el ambiente aislado para el curado de la pieza. El ciclo de curado tenía una duración total de 10 horas.

Montaje de las vigas del tablero

El vehículo especial de transporte traslada las vigas una a una al inicio del tramo n-1, donde estaba dispuesta una viga de lanzamiento reticulada metálica, de una longitud total de 2.2 veces la longitud del tramo de viaducto ($n-1 + n + 0.20 n+1$), resultando una longitud total de 94 m, apoyada mediante un sistema de patas metálicas sobre el dintel de las pilas previamente construidas.

La viga de lanzamiento estaba provista de un par de carros deslizantes que permitían izar la viga del camión, y desplazarla longitudinalmente hasta el próximo tramo, moverla transversalmente hasta su posición definitiva en el tablero y luego descenderla sobre los apoyos definitivos del tramo n-1 y del tramo n. Con una sola posición de la viga de lanzamiento era posible montar dos tramos contiguos de tablero.

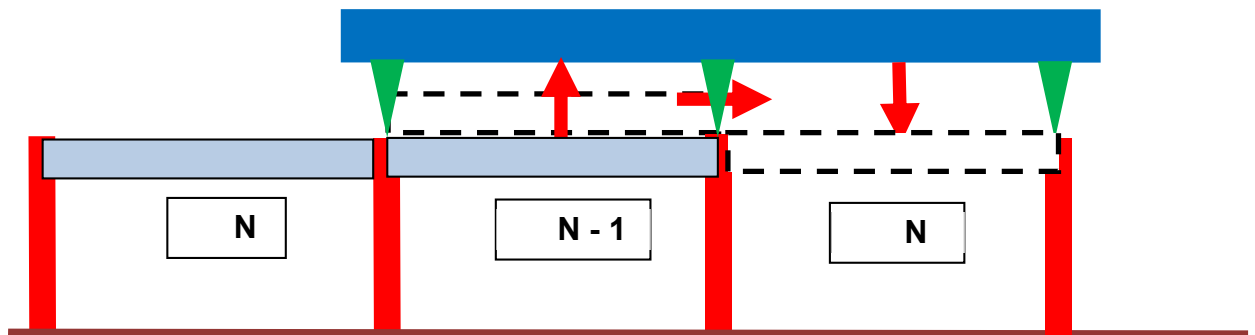


Figura 6. Esquema conceptual del montaje con viga de lanzamiento



Figura 7. Vista de la viga de lanzamiento durante el montaje de vigas en Viaducto 1

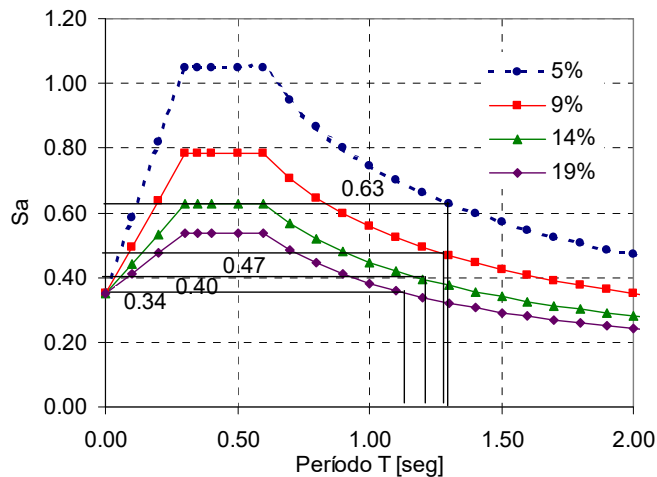


Figura 9. Esquema conceptual del comportamiento de una estructura aislada

En la Figura 10 se muestra la distribución en planta de los dispositivos de apoyo resultantes del diseño de aislación sísmica del Viaducto 1. En la Tabla 1 se detallan las características geométricas y mecánicas de los aisladores utilizados en el Viaducto 1.

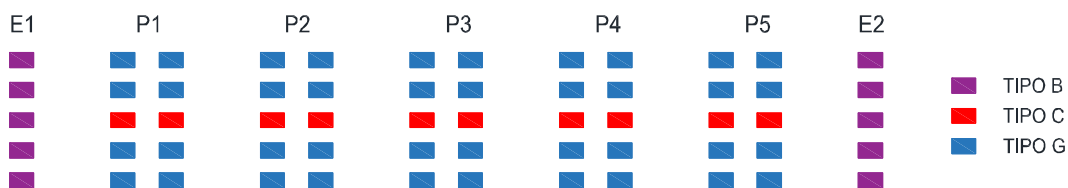


Figura 10. Distribución en planta de los aisladores LRB del Viaducto 1

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.

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

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]	F_y [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

Calibrando adecuadamente las rigideces laterales de los aisladores elastoméricos y las capacidades en fluencia de los núcleos de plomo se logró 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 significativo del corte sísmico hacia estos elementos sin superar la capacidad geotécnica de extracción o arranque de la ladera sobre la que se apoyan, aliviando las solicitaciones en las pilas, y en consecuencia, reduciendo su momento de vuelco y el tamaño de sus fundaciones.

En la Tabla 2 se muestran los valores máximos de deformación del tablero para los estados de carga de viento, movimientos lentos y sismo, respectivamente, observándose el buen desempeño de los aisladores con núcleo de plomo en el control de las deformaciones de servicio y el control de la demanda de deformaciones durante el sismo de diseño.

Tabla 2. Deformaciones del tablero del Viaducto 1 en pilas y estribos

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

JUNTAS DE DILATACIÓN

Se dispuso la instalación de una junta de dilatación especial en cada estribo (en correspondencia con los extremos del viaducto), del tipo “Junta Modular de Perfiles”, diseñada para absorber las deformaciones producidas por las acciones de frenado, retracción, fluencia y cambios térmicos en el tablero, conjuntamente con las deformaciones longitudinales y transversal esperadas para el evento sísmico de operación normal correspondiente a la zona de emplazamiento de la obra. En la Figura 11 se muestra un esquema de las juntas de dilatación previstas en el tablero del viaducto.

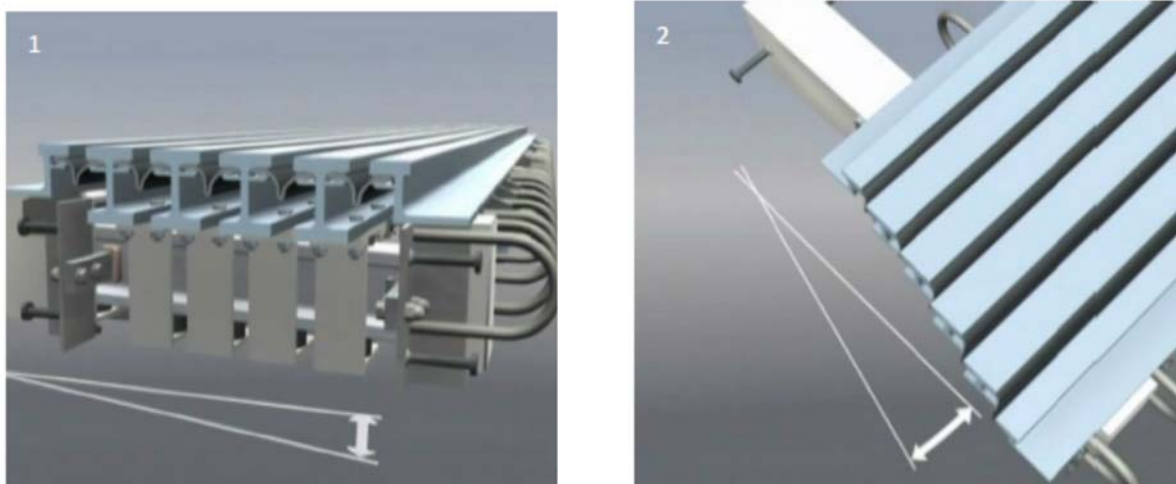


Figura 11. Esquema de junta de dilatación modular (fuente: MAGEBA)



CONSIDERACIONES SOBRE ASPECTOS ECONÓMICOS DEL DISEÑO

El sistema de aislamiento sísmico protege las pilas, evitando o minimizando la incursión en el rango plástico de los componentes de hormigón armado, lo que garantiza la funcionalidad de la estructura post sismo y reduce la probabilidad de daño estructural y su reparación.

Se destaca que, para el caso en estudio, el costo de inversión inicial de los aisladores sísmicos resultó del orden del 5% del costo total de la estructura del viaducto sin incluir el costo de los accesos, pero las economías logradas principalmente en las dimensiones y armaduras de las fundaciones y de los fustes y armaduras de pilas, permite lograr un ahorro general del orden del 7 % en el costo de inversión de la obra con aislación respecto a un diseño sísmico tradicional.

Sin embargo, el mayor beneficio de la adopción de un sistema de aislación sísmico se encuentra en la evaluación del costo total de vida útil de la estructura, que incluye el término del costo asociado la reparación y/o reposición de la estructura frente a la probabilidad de ocurrencia del sismo de diseño, como así también las externalidades relacionadas al valor presente de los aumentos del costo de transporte en el caso de pérdida de funcionalidad de los mismos por daño de origen sísmico durante la vida útil de la estructura.

En el caso del diseño sísmico tradicional, la estructura incursiona en el campo plástico en los sectores elegidos por el proyectista para ubicación de las rótulas plásticas, la estructura en general quedará fuera de operación por un largo período de tiempo y será necesario reparar y/o demoler y reemplazar la estructura completa, mientras que la estructura que incluye un sistema de aislación sísmica mitiga o reduce el riesgo sísmico, y en caso de ocurrencia del sismo de diseño será necesario realizar intervenciones en la estructura de bajo costo, o incluso, la estructura podría soportar el sismo prácticamente sin ningún nivel de daños.

PRUEBAS DE VIBRACIONES EN CONDICION DE SERVICIO

En relación a la respuesta dinámica en servicio de los viaductos, se evaluó el nivel de confort de los usuarios sometidos a vibraciones dinámicas verticales y horizontales, utilizando los criterios de admisibilidad de la norma española IAP-11, medido en términos de rangos de aceleraciones límites verticales y horizontales.

En relación a las vibraciones verticales por el paso de los vehículos cargados, se pudo comprobar mediante los ensayos experimentales que las aceleraciones verticales para todos los ensayos realizados en el Viaducto 1 estuvieron comprendidas en el rango del 1.5 al 2.7% de la aceleración de la gravedad, es decir, fueron menores del 5% (0.5 m/s^2) que garantiza un máximo grado de confort de acuerdo a los criterios de la norma española IAP-11 en relación al confort de los usuarios de las estructuras frente a vibraciones.

En relación a las vibraciones horizontales registradas durante las pruebas de frenado, se pudo comprobar que los valores de aceleración horizontal longitudinal para los dos ensayos realizados fueron de 0.3 % de la aceleración de la gravedad, es decir, un valor



relativamente bajo e inferior al límite admisible del 1% (0.1 m/s^2) que garantizan un máximo grado de confort para los usuarios.

Las pruebas dinámicas permitieron evaluar y comprobar la aptitud de los aisladores sísmicos para controlar las deformaciones y aceleraciones de la estructura en servicio, verificándose que la respuesta dinámica de los viaductos se encuentra dentro de un rango de alto confort para los usuarios.

CONCLUSIONES

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 en los estribos.

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 o minimizando la incursión en el rango plástico de los componentes de hormigón armado, 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 de los accesos, pero las economías logradas principalmente en las fundaciones y pilas, permite lograr un ahorro general del orden del 7% en el costo de inversión de la obra con aislación respecto a un diseño sísmico tradicional