

# Puentes en Carretera Panamericana. Análisis de alternativas y estrategias sísmicas

## *Bridges in Panamericana Road. Analysis of alternatives and seismic strategies*

Luis Carrillo Alonso <sup>a</sup>, Mariano Martín Cañueto <sup>b</sup>, Angel Carrasco Conejo <sup>c</sup>,

David Pérez Fernández <sup>d</sup>, Jaime B. Ruiz-Ruano Alvarez <sup>e</sup>, Mayra Toledo Serrano <sup>f</sup>

<sup>a</sup>Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Jefe Departamento de Estructuras de Obra Civil-Hormigón. Acciona Ingeniería.

[luis.carrillo.alonso@acciona.com](mailto:luis.carrillo.alonso@acciona.com)

<sup>b</sup>Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Gerente de Estructuras. Acciona Ingeniería.

[mariano.martin.canueto@acciona.com](mailto:mariano.martin.canueto@acciona.com)

<sup>c</sup>Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Jefe de Proyectos. Dptm. Estructuras de Obra Civil. Acciona Ingeniería.

[angel.carrasco.conejo@acciona.com](mailto:angel.carrasco.conejo@acciona.com)

<sup>d</sup>Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Ingeniero de Proyectos. Dptm. de Estructuras de Obra Civil. Acciona Ingeniería.

[david.perez.fernandez@acciona.com](mailto:david.perez.fernandez@acciona.com)

<sup>e</sup>Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Ingeniero de Proyectos. Dptm. de Estructuras de Obra Civil. Acciona Ingeniería.

[jaimebasilio.ruizruano.alvarez@acciona.com](mailto:jaimebasilio.ruizruano.alvarez@acciona.com)

<sup>f</sup>Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos. Ingeniera de Proyectos. Dptm. de Estructuras de Obra Civil. Acciona Ingeniería.

[maira.toledo.serrano@acciona.com](mailto:maira.toledo.serrano@acciona.com)

### RESUMEN

El consorcio Loma Cova, del que forma parte Acciona, resultó adjudicatario de la ampliación y mejora de un tramo de la carretera Panamericana, siendo Acciona Ingeniería la responsable del proyecto de las estructuras. Este proyecto presentaba la singularidad de situarse en una zona de alto riesgo sísmico. Para resolver esta problemática se desarrolló un estudio inicial de las posibles estrategias sísmicas a implementar: aislamiento y disipación de energía por medio de la ductilidad. Ambos planteamientos fueron evaluados y comparados mediante su aplicación a una estructura en concreto del proyecto, para, a partir de los resultados obtenidos, decidir cuál debía ser la estrategia a implementar en el diseño.

### ABSTRACT

Acciona being member of a joint venture was awarded for the extension and improvement of the Panamericana road, being Acciona Engineering responsible of the structural design. The project presented the main challenge of the high seismic risk of the area. Such challenges were evaluated considering two seismic strategies: isolation and energy dissipation through ductility, trying to reach the bespoke solution that adapts to the conditions of the project.

**PALABRAS CLAVE:** sismo, aislamiento, HDRB, disipación energía, ductilidad, estrategia sísmica

**KEYWORDS:** earthquake, isolation, HDRB, energy dissipation, ductility, seismic strategy

# 1. Descripción general del proyecto

El ministerio de Obras Públicas de Panamá (MOP) está desarrollando los proyectos de ampliación de la red viaria entre el área metropolitana de la Ciudad de Panamá y los nuevos desarrollos urbanos del lado Oeste del Canal. Dentro de este marco de actuaciones Acciona Construcción en consorcio resultó adjudicataria del tramo de la carretera Panamericana entre Arraiján y Puente de las Américas, responsabilizándose tanto del proyecto como de la construcción del tramo, siendo Acciona Ingeniería, en colaboración con FHECOR Ingenieros Consultores, la responsable de la redacción del proyecto de todas las estructuras.

Dicho tramo plantea la ampliación y mejora de la Carretera Panamericana en una longitud aproximada de 8 km. Adicionalmente, se actúa a lo largo de 3 km sobre la Vía Centenario, aumentando su capacidad y mejorando sus enlaces.

El proyecto incluye la construcción de 17 nuevas estructuras, de las cuales 11 son puentes o viaductos que responden a la necesidad de resolver cruces de calzada a distinto nivel en su mayoría, siendo casi todos ellos puentes con tableros de vigas prefabricadas postesadas, alcanzándose luces de hasta 41 metros.

En la Tabla 1 adjunta se resumen las principales características de las estructuras que forman parte del presente proyecto.

# 2. Condicionantes de diseño

En las primeras fases de la elaboración de proyecto, se detectaron los aspectos clave que debían tenerse en cuenta para el desarrollo de la solución más adecuada a los requerimientos del Cliente. Estos básicamente eran:

1) Efectuar las mínimas alteraciones posibles al tráfico existente en la actual Carretera Panamericana durante las obras. Por este

motivo, se debería evitar la ocupación en superficie que generan las cimbras necesarias para la ejecución de tableros “in-situ”, por lo que, en general, se debía optar por una tipología de estructuras prefabricadas, de rápida ejecución y mínima afección al tráfico.

**Tabla 1. Características de las estructuras.**

Estructura	Luz vanos (m)	Anchura tablero (m)	Altura pila (m)
E-2	37+32+37	28.75	7.80
E-4	38+38+26+26+26	12.00	10.90
E-5	25+26+26	10.90	8.80
E-6	30	27.85	-
E-11	34+37	17.50	10.00
E-12	37+41+41+41+41+41	11.90	16.50
E-13	23	(Pérgola)	5.30
E-14	18	(Pérgola)	
E-15	21+23+21	7.90	8.20
E-16	26+34	25.60	4.60

2) Elevado riesgo sísmico. La normativa local técnica empleada fue la REP-14 [5]. Esta normativa panameña es de reciente redacción y en ella se han visto modificados los mapas sísmicos de aplicación en la zona. Este cambio se ha basado en la información obtenida a partir de los estudios geotécnicos realizados durante la construcción de la Ampliación del canal de Panamá y ha repercutido en un incremento de los valores de la aceleración del terreno a considerar.



**Figura 1. Mapa de aceleración sísmica (REP-14).**

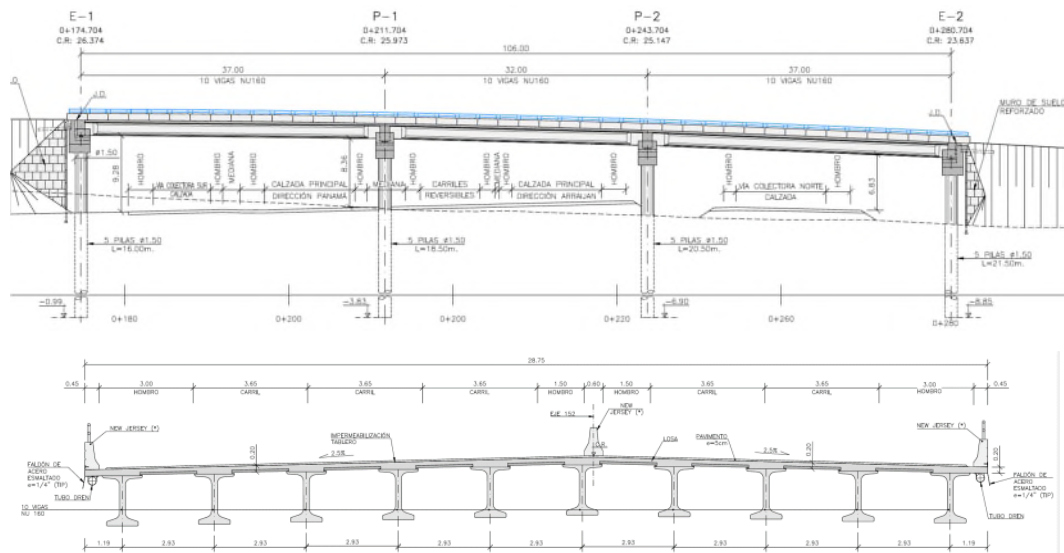


Figura 2. Alzado y sección del tablero de la estructura E-2. Paso superior con tablero de gran ancho

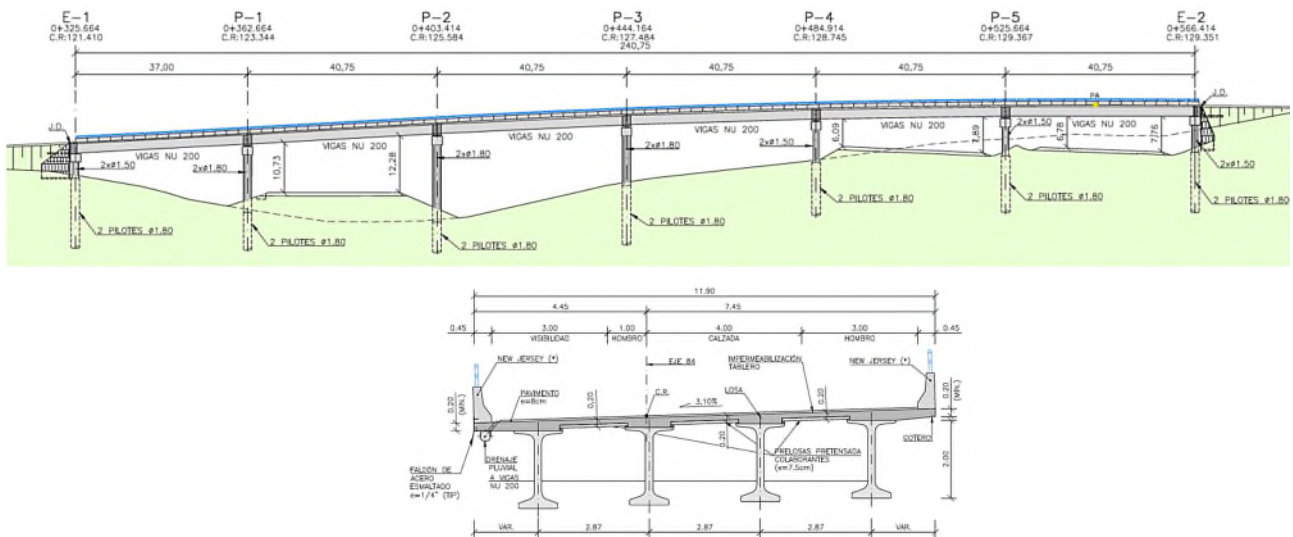


Figura 3. Alzado y sección del tablero de la estructura E-12. Paso superior con tablero de pequeño ancho

Los periodos de retorno a considerar, para la determinación del espectro de aceleraciones sísmicas, en el caso de los pasos superiores era de  $T=1000$  años (estructuras esenciales) y de  $T=2500$  años para las estructuras situadas en el tronco (estructuras críticas). Resultaban así aceleraciones en la meseta del orden de  $1.00g - 1.20g$ , lo que indicaba la importancia de la acción sísmica en el diseño.

A continuación, en la Tabla 2, se muestra un resumen de los parámetros sísmicos y los tipos de suelo de las principales estructuras.

Tabla 2. Parámetros sísmicos y tipo de suelo

Estructura	PGA (g)	$S_1$ (g)	$S_s$ (g)	Suelo	Zona sísmica
E-2	0.794	0.66	1.94	C	4
E-4	0.82	0.65	1.98	D	4
E-5	0.817	0.67	1.98	D	4
E-6	0.812	0.67	1.97	C	4
E-11	0.548	0.45	1.35	D	4
E-12	0.535	0.44	1.30	D	4
E-15	0.516	0.43	1.28	D	4
E-16	0.498	0.42	1.27	D	4

3) Evitar disponer elementos que requirieran en un futuro de un elevado mantenimiento, como

podieran ser los tableros metálicos, juntas, apoyos tipo LRB, amortiguadores, etc.

4) Adecuación de las soluciones a los medios y costumbres constructivas del país.

5) Otro condicionante común en toda la traza es la baja capacidad portante del terreno, que obliga a cimentaciones profundas en casi todas las estructuras. Los terrenos de cimentación se clasifican como tipo C y D.

El diseño a desarrollar debía partir entonces tanto de las ideas anteriores, como de las tipologías plasmadas en consecuencia en el proyecto de Licitación, que resultó aprobado por el Cliente.

En dicho proyecto se optó por la ejecución de la mayoría de las estructuras mediante tableros prefabricados isostáticos (con continuidad únicamente de la losa de compresión y riostras sólo en extremo de vigas), cimentaciones mediante encepados de pilotes en muchos de los casos y estribos conformados por macizos de suelo reforzado. De esta forma, mediante el uso de elementos prefabricados autoportantes (vigas y prelosas) no se requería el uso de cimbras. Además las losas de compresión de los tableros se diseñaban sin juntas entre vanos adyacentes, que pudieran afectar a la rodadura de los vehículos, reduciendo su número al mínimo, al disponerse únicamente en estribos. Como elementos de apoyo de los tableros se planteaba el uso de neoprenos bajo cada viga.

## 2. Estudio de soluciones y estrategias sísmicas

Partiendo de los condicionantes anteriormente expuestos y en vistas de la importancia de la acción sísmica en el diseño final, al inicio del proyecto de detalle se plantearon una serie de alternativas estructurales con el fin de conseguir el diseño final más adecuado.

En primer lugar se plantearon dos alternativas en relación al tipo de tablero:

1) Solución isostática, cuya principal ventaja es su fácil ejecución, dado que en este caso sólo es necesario materializar pequeñas riostras entre los extremos de las vigas, para transmitir de forma adecuada la acción sísmica en los apoyos.

2) Solución hiperestática, en la cual se da continuidad a flexión a los tableros sobre pilas, mediante la ejecución de potentes riostras “in situ”. Con esta solución se puede reducir el número de vigas necesarias, y por lo tanto la masa total del tablero, a costa de una ejecución más laboriosa.

Además, con la finalidad de reducir la masa del tablero, se optó por el uso de prelosas colaborantes, viéndose reducido también así el espesor de la losa de compresión.

Otra de las decisiones adoptadas durante la fase de diseño, fue la eliminación de los encepados de los pilotes, para, por un lado dotar a la estructura de la mayor flexibilidad posible, en vistas a reducir la acción sísmica, además de poder contar con la mayor rapidez de ejecución de las pilas-pilote.

Por último, se evaluaron las dos estrategias sísmicas clásicas a considerar en aquellas estructuras situadas en zonas de alto riesgo: bien el aislamiento o bien la disipación de energía.

### 2.1 Estrategia 1: Aislamiento sísmico

La primera alternativa estudiada fue la del aislamiento del tablero mediante neoprenos de alto amortiguamiento (HDRB). Estos apoyos de neopreno permiten el aislamiento de la estructura debido a su gran capacidad de deformación.

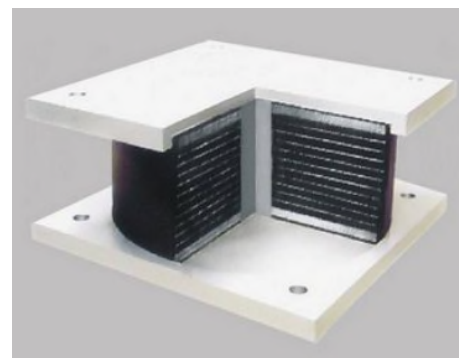


Figura 4. Esquema neopreno ISOSISM HDRB [8]

Este tipo de apoyos cuentan con un efecto doble para reducir las fuerzas sísmicas y generar el aislamiento del tablero: por un lado, su flexibilidad, la cual permite aumentar el periodo fundamental de vibración de la estructura y por lo tanto reducir la aceleración espectral aplicada y por ende las fuerzas sísmicas asociadas. Por otra parte poseen la capacidad de incrementar el amortiguamiento de la estructura en base a la disipación de energía que en ellos se produce, aspecto éste específico de este tipo de apoyos, modificándose en consecuencia el espectro de respuesta a considerar. La penalización asociada al aislamiento es que la estructura sufrirá unas deformaciones importantes, que habrá que ser capaces de acomodar entre los distintos elementos que la componen mediante holguras suficientes.

Otra de las grandes ventajas del aislamiento es la capacidad de mantener a la estructura en rango elástico durante el evento sísmico, de tal forma que sobre ésta no se produzcan daños, evitándose así la necesidad de posibles reparaciones, pudiéndose volver a poner en servicio de forma casi inmediata.

Por último hay que destacar también, en línea con lo indicado en el párrafo anterior, que estos apoyos poseen la capacidad del recentrado de la estructura después de la ocurrencia del sismo.

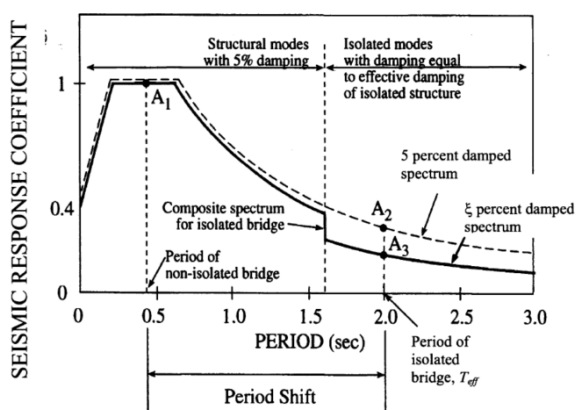


Figura 5. Decalaje del espectro sísmico debido al uso de apoyos HDRB acorde a [2]

En la figura anterior se muestra uno de los aspectos específicos favorables de este tipo de

apoyos, como es el incremento del amortiguamiento de la estructura. El procedimiento recogido en [2] indica que el efecto de la modificación del amortiguamiento equivalente, composición del propio de la estructura y el del neopreno, debe aplicarse decalando el espectro de respuesta, en función del nuevo valor, en un entorno del 80% de los periodos principales de vibración en cada dirección analizada.

## 2.2 Estrategia 2: Disipación de energía

La segunda estrategia considerada buscaba la posibilidad de reducir la acción sísmica mediante la disipación de energía, por medio de la ductilidad de la propia subestructura. En concreto, la idea a adoptar se basaba en disponer un tablero hiperestático al que se le dejara libertad para su desplazamiento en sentido longitudinal, mediante el uso de neoprenos convencionales, permitiéndose así las deformaciones generadas en servicio, mientras que en sentido transversal se coaccionaban sus desplazamientos mediante la instalación de topes sísmicos.

Con esta configuración y considerando admisible un nivel de daño moderado en la estructura tras resistir un evento sísmico, se aplicó una estrategia basada en la ductilidad, mediante un método “force-based” considerando el uso de factores de respuesta (R). Así, el esquema adoptado fue:

- Sismo transversal → Topes transversales  
Factor de respuesta  $R=2.0$
- Sismo longitudinal → Apoyos neopreno  
Factor de respuesta  $R=1.50$

Por tanto, mediante el uso de la ductilidad de la estructura, se está admitiendo la posibilidad de la formación de rótulas plásticas, acorde a lo dispuesto en AASHTO LRFD Bridge Design Specifications [1]. Esta norma permite que dichas rótulas plásticas se materialicen en aquellas zonas inspeccionables y reparables, como pueden ser los fustes de las pilas. A su vez,

a los elementos estructurales adyacentes a la zona donde se producirá la plastificación, dintel y pilotes, se les deberá dotar de una capacidad resistente adicional, para así poder contar en ellos con una cierta sobrecapacidad, la cual permita compensar la resistencia real de los materiales en la zona de las rótulas. De esta forma se busca garantizar que el elemento fusible, donde se producirá la plastificación, es aquel que se está considerando en el diseño. A su vez para garantizar la ductilidad seccional necesaria deberá calcularse de forma adecuada el confinamiento del hormigón mediante la disposición de armadura suficiente en los fustes en forma de cercos.

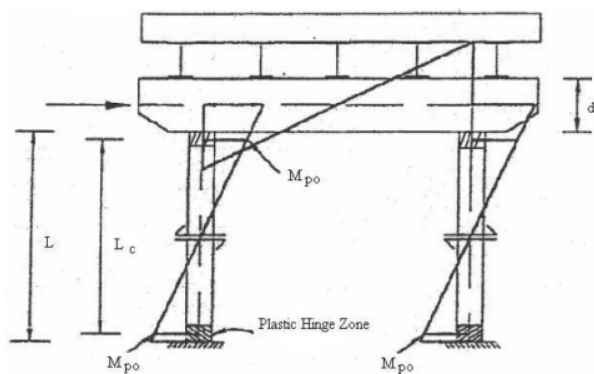


Figura 6. Diseño por capacidad. Concepto de sobrerresistencia[4]

### 3. Análisis particular sobre la Estructura E-11

Para poder evaluar la idoneidad de cada una de las estrategias anteriores, se realizó un análisis comparativo entre ambas, para el caso concreto de la estructura E11.

La estructura E-11 corresponde a un paso superior situado en P.K. 7+274.445 del tramo. La longitud total del paso superior es de 71.70 metros, dividido en dos vanos de 34.10 metros y 37.60 metros.

El estudio realizado se basó en la comparación de dos soluciones diferentes: una

primera donde se planteaban tableros isostáticos y aislamiento mediante apoyos HDRB (uno por viga), y una segunda opción donde se proponía un tablero continuo sobre apoyos de neopreno convencionales (uno por viga en estribos y uno entre cada 2 vigas en pila) y que quedaba a su vez coaccionado por topes transversales. El tablero de cada vano estaba formado por 8 vigas en el caso isostático y 6 en el hiperestático, todas ellas de tipo Nebraska de 1.60 metros de canto. La anchura del tablero era de 17.50 metros.

Los estribos y la pila se conformaban mediante un pórtico sobre 3 pilas-pilotes de  $\varnothing 1.80$  m y un dintel de canto mínimo 1.50m. Las alturas de los fustes máximas resultan de 9.50m en el estribo 2, siendo las longitudes de pilotes de hasta 29 m. Los terraplenes de acceso a los estribos quedaban contenidos por muros de suelo reforzado, los cuales independizaban la estructura de los empujes de tierras.

#### Estrategia 1: Aislamiento sísmico

Se planteó el aislamiento mediante el uso de neoprenos HDRB D450 B 500 Z 370. Estos apoyos permiten dotar a la estructura de flexibilidad longitudinal y transversal, además de un amortiguamiento adicional. Eso sí, hay que tener en cuenta que el grado de aprovechamiento de sus propiedades dependerá de la rigidez relativa pila o estribo/neopreno. Es decir, que si la cimentación ya es flexible en sí misma, puede resultar que el neopreno no alcance su rango máximo de deformaciones y por lo tanto no sea eficaz.

Para verificar su aprovechamiento se realizó un análisis de la subestructura, obteniéndose la relación existente entre las rigideces de los diferentes elementos. A continuación, se muestran los principales resultados del análisis:

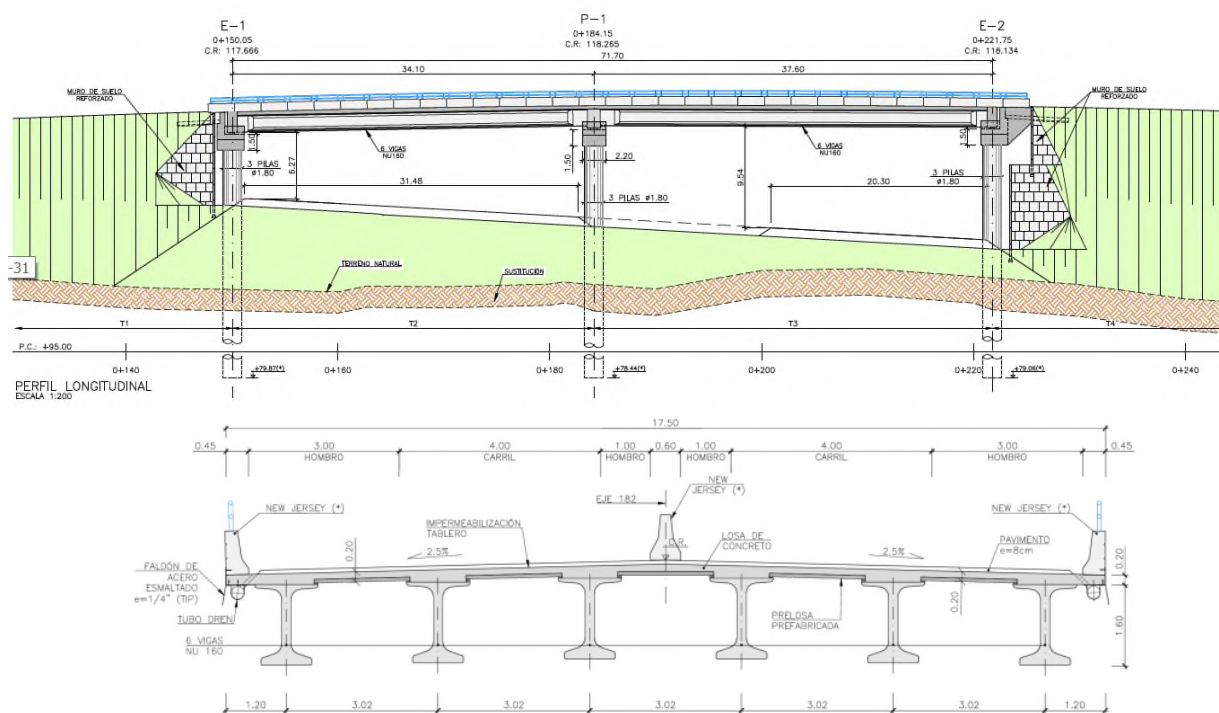


Figura 7. Alzado y sección transversal de la Estructura E-11

Tabla 3. Rigidez de subestructura ( $k_{sub}$ )

	Long. (kN/m)	Trans. (kN/m)
E1	36.778	129.017
Pila	14.861	54.928
E2	10.393	50.533

Tabla 4. Rigidez estribo ó pila + neoprenos (k)

	Long. (kN/m)	Trans. (kN/m)
E1	13.884	19.017
Pila	11.147	24.616
E2	7.090	15.474

Tabla 5. % de  $k_{neo}$  respecto a k

	Long.	Trans.
E1	62	85
Pila	25	55
E2	32	69

Tabla 6. Relación de rigideces estribo ó pila / neoprenos ( $n = k_{sub}/k_{neo}$ )

	Long.	Trans.
E1	1,65	5,78
Pila	0,33	1,23
E2	0,47	2,27

Como puede deducirse de las tablas anteriores, la influencia de la flexibilidad de los neoprenos no es del todo clara. Incluso se observa que, en el análisis longitudinal, el efecto principal sobre la rigidez conjunta es la de la cimentación ( $n < 1$ ). Así, la escasa rigidez de la cimentación hace que no se movilice por completo la capacidad de deformación del neopreno, perdiendo efectividad.

Además, el otro efecto beneficioso de este tipo de apoyos, como es aumentar el amortiguamiento viscoso ( $\zeta_{neop} = 16\%$ ), tampoco se podrá aprovechar eficazmente, dado que el amortiguamiento equivalente con el que decalar el espectro sísmico, composición del propio de la estructura y del apoyo, será de 14,2% en el sentido transversal y de sólo el 11,1% en el sentido longitudinal.

En definitiva, de estos resultados se puede deducir que en el caso analizado no resulta rentable disponer apoyos HDRB, dado que no se pueden aprovechar sus ventajas de forma íntegra. Es más, dada la flexibilidad de la cimentación y la poca exigencia en movimientos que se traslada a los neoprenos, éstos podrían ser de tipo convencional. Bien es cierto que esta estructura cuenta con una cimentación especialmente flexible, situación que no se repetía de forma tan acusada en otras estructuras de este mismo proyecto.

En cualquier caso los primeros modos de vibración fundamental de la estructura obtenidos en este caso tienen un periodo de 1.86s en sentido longitudinal y de 1.29s en sentido transversal, obteniendo unas aceleraciones sísmicas de 0,23g y 0,33g respectivamente.

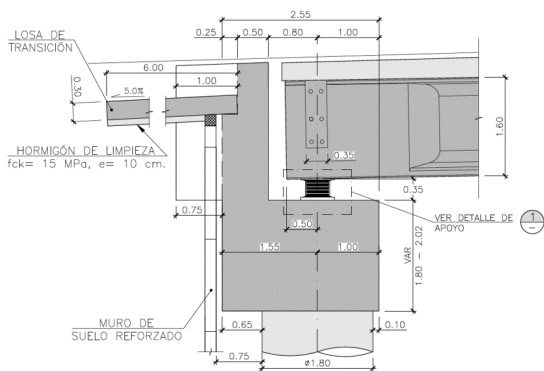


Figura 8. Detalle apoyo estribo E-11 con aislamiento sísmico.

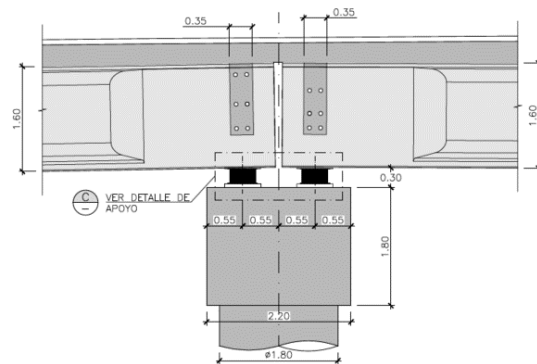


Figura 9. Detalle apoyo pila E-11 con aislamiento sísmico.

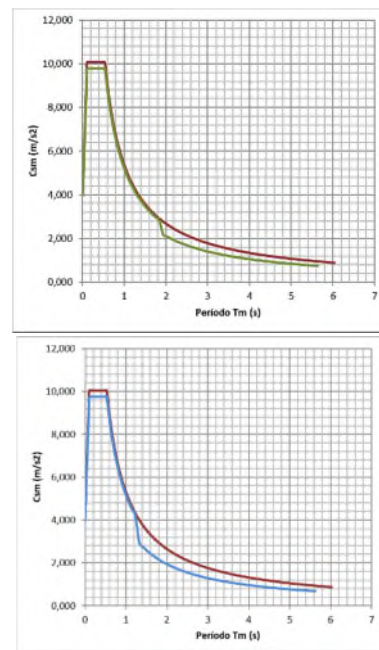


Figura 10. Espectros de diseño para sismo longitudinal y transversal "decalados"

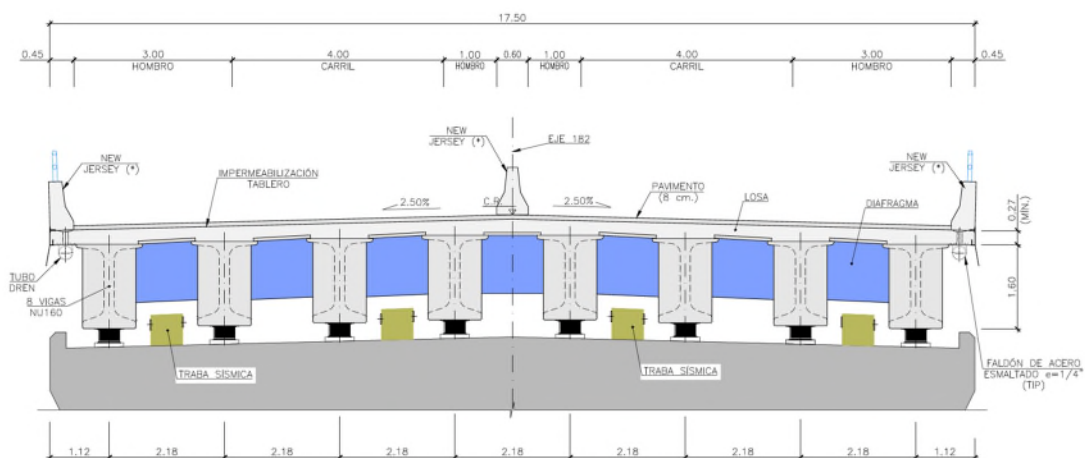


Figura 11. E11. Sección transversal de tablero sobre apoyos para la solución con aislamiento sísmico.



## Estrategia 2: Disipación de energía

Por medio de esta estrategia, se dotó al viaducto de apoyos convencionales de neopreno zunchado, los cuales aportan una gran rigidez vertical y capacidad de deformación en sentido longitudinal. Transversalmente, se disponen toques sísmicos en los extremos de las riostras de estribos y pila. Al disponerse en la pila los apoyos de neopreno bajo la riostra (las vigas se descansarán provisionalmente sobre apoyos provisionales hasta la ejecución de la continuidad), resulta posible disponer sólo uno entre cada viga, de tal forma que se reduce el número de apoyos colocados respecto de la solución isostática, flexibilizando su contribución.

Con esta configuración, los periodos de vibración de la estructura obtenidos son los siguientes:

- Periodo del primer modo de vibración longitudinal: 2.07 s
- Periodo del primer modo de vibración transversal: 0.97 s

Por tanto, se obtienen unas fuerzas sísmicas de  $0,27g/1.5 = 0.18 g$  (longitudinal) y  $0,54g/2 = 0.27g$  (transversal), una vez reducidas por el coeficiente de respuesta pertinente.

En base a los resultados obtenidos del análisis anterior, se puede ver como las fuerzas sísmicas disminuyen un 21% en sentido longitudinal y un 18 % en sentido transversal, respecto de la solución isostática con aislamiento.

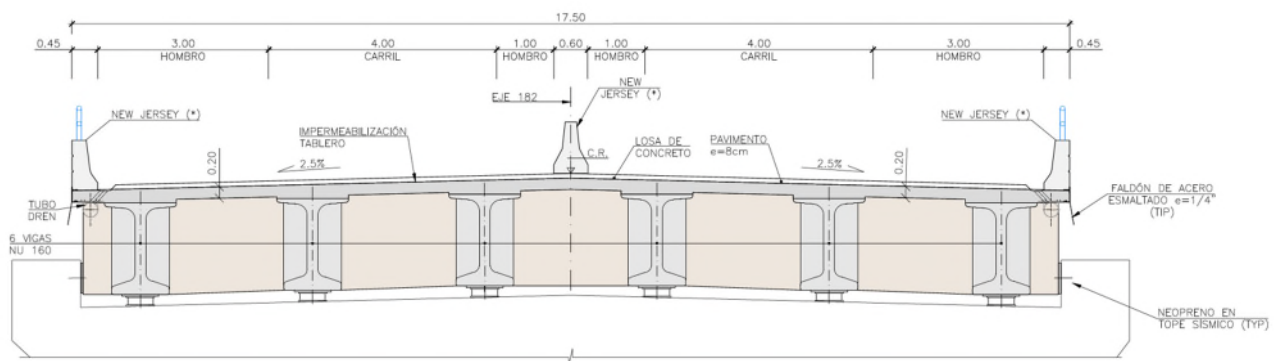


Figura 12. Sección transversal E-11 con neoprenos y toques transversales.

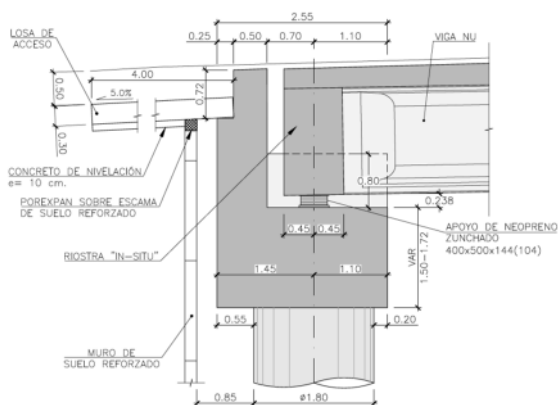


Figura 13. Detalle apoyo estribo E-11 para solución con tablero continuo.

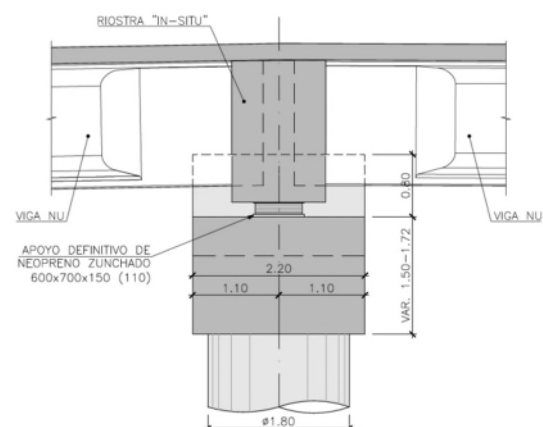
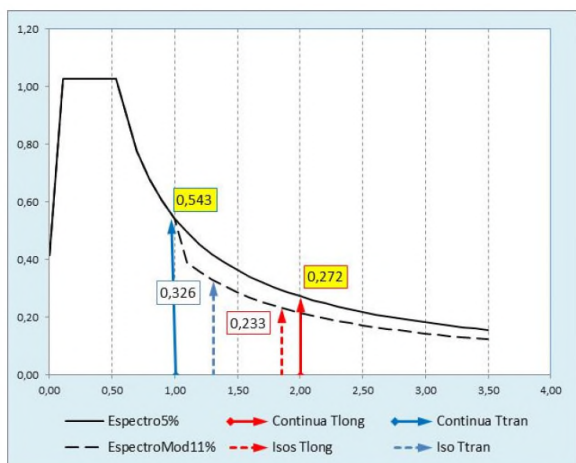


Figura 14. Detalle apoyo pila E-11 para solución con tablero continuo.



**Figura 15. Aceleraciones obtenidas para los primeros modos long. y transv. de cada solución.**

## 4. Conclusiones

En el caso del proyecto de las estructuras del tramo Arraiján-Puente de las Américas de la carretera Panamericana, la acción sísmica resultaba determinante, por lo que fue necesario desarrollar un estudio que permitiera ajustar la solución presentada en el proyecto preliminar de Licitación.

Dicho estudio se planteó en base a diferentes alternativas, por un lado para los tableros prefabricados de vigas y por otro según las dos estrategias clásicas para resistir la acción sísmica: aislamiento y ductilidad.

Se aplicó dicho análisis para el caso concreto de la estructura E11, donde la disyuntiva entre las dos estrategias sísmicas se resolvió finalmente por el uso de la disipación de energía.

Los condicionantes geotécnicos y sísmicos de la zona obligaron a diseñar cimentaciones profundas, que en el caso de la estructura E11 resultaban muy flexibles, lo que implicaba la pérdida de efectividad del aislamiento sísmico.

La solución basada en el uso de la ductilidad aportaba la reducción de fuerzas sísmicas y por tanto de ahorro de materiales, a costa de admitir un cierto daño en la estructura en las rótulas plásticas. En contra esta solución cuenta con la mayor complejidad constructiva

que implica la ejecución de las pesadas riostras “in situ” de continuidad.

## Agradecimientos

Desde Acciona Ingeniería queremos agradecer el trabajo realizado y la colaboración prestada por nuestros compañeros de FHECOR Ingenieros Consultores Javier de Cabo y Antonio Romero, así como por sus respectivos equipos, para el desarrollo de estos trabajos.

## Referencias

- [1] AASHTO, AASHTO LRFD Bridge Design Specification, 8a Edición, American Association of State and Transportation Officials, 2017.
- [2] AASHTO, Guide Specifications for Seismic Isolation Design, 3ra Edición, American Association of State and Transportation Official, 2010.
- [3] AASHTO, Guide Specifications for LRFD Seismic Bridge Design, 1ra Edición, American Association of State and Transportation Official, 2009.
- [4] Comité Europeo de Normalización, EN 1998-2. Eurocódigo 8. Proyecto para la resistencia al sismo de las estructuras, Parte 2: Puentes, Bruselas 2005.
- [5] Junta Técnica de Ingeniería y Arquitectura, Reglamento Estructural Panameño, REP-14, Ministerio de Obras Públicas de Panamá 2014.
- [6] ATC/MCEER Joint Venture, MCEER/ATC 49, Recommended LRFD Guidelines for the Seismic Design of Highway Bridges, 2003
- [7] CALTRANS, Seismic Design Criteria, Version 1.7, Abril 2013.
- [8] FREYSSINET, Catálogo Earthquake protection devices ISOSISM range.