

INSPECCIÓN VISUAL DEL DAÑO DE APOYOS TIPO POT EN PUENTES EN ZONA DE ISLAS DE LA CONEXIÓN FÍSICA ROSARIO- VICTORIA EN JUNTAS GERBER Y ESTRIBOS Y SU CORRELACIÓN CON LA FLEXIBILIDAD LATERAL DEL TABLERO

Juan José Villafañe, Pedro Huerta Soaje; Antonio Manuel Prato; Ignacio Assadourian
Ingenieros Civiles

SETEC SRL, juanjvillafane@yahoo.com.ar, pjfhuelas@gmail.com

Palabras clave: Puentes Luces Medias, Aparato de Apoyo POT, Articulación Gerber, Flexibilidad Lateral, Viento, Desplazamientos, Vórtices Von Kármán

RESUMEN

El presente trabajo analiza las patologías observadas en apoyos tipo “POT” de los puentes ubicados en la Zona de Islas de la Conexión Física Rosario–Victoria. Desde su inauguración en 2003, se dispone de un registro sistemático de inspecciones visuales a lo largo de más de 20 años. A partir de 2014 se ha identificado un corrimiento de la lámina de teflón en los dispositivos de apoyo, tanto en dirección longitudinal como transversal. El desplazamiento longitudinal se asocia principalmente a efectos térmicos, mientras que el corrimiento transversal se vincula con la flexibilidad lateral del tablero (de dos carriles y luces típicas de 46–60–60–60–46 m), que lo hace susceptible a vibraciones inducidas por el tránsito. Se evalúa el efecto de acciones cíclicas por resonancia del tablero por la presencia de Vórtices de Von Kármán. En este contexto, se presentan resultados de análisis numéricos y se plantea campaña de mediciones in situ de aceleraciones y desplazamientos en juntas de estribos y apoyos intermedios tipo Gerber. Se propone un diagnóstico del comportamiento observado.

ABSTRACT

This paper analyzes the pathologies observed in “POT”-type bearings of the bridges located in the Island Zone of the Rosario–Victoria Physical Connection. Since its inauguration in 2003, a systematic record of visual inspections has been available over more than 20 years. Beginning in 2014, a displacement of the Teflon sheet in the bearing devices has been identified, both in the longitudinal and transverse directions. The longitudinal displacement is mainly associated with thermal effects, while the transverse displacement is linked to the lateral flexibility of the deck (with two traffic lanes and typical spans of 46–60–60–60–46 m), which makes it susceptible to traffic-induced vibrations. The effect of cyclic actions due to deck resonance caused by the presence of Von Kármán vortices is evaluated. In this context, results of numerical analyses are presented, and an in situ measurement campaign of accelerations and displacements at abutment joints and intermediate Gerber bearings is proposed. A diagnosis of the observed behavior is proposed.

Introducción y metodología

En el presente trabajo se identifican los casos en todos los puentes en zona de islas donde se presenta un corrimiento de la lámina de teflón en los apoyos tipo POT. Lo primero que llama la atención es que el corrimiento se manifiesta tanto en el sentido longitudinal como transversal en referencia al eje del camino. Se estudian en detalle las partes que componen estos apoyos y se fotografían todos los corrimientos y su evolución en el tiempo desde el año 2003 al 2023. Los primeros casos se empiezan a detectar en el año 2014 (11 años después de la inauguración), nuevos casos aparecen en el año 2015. En el año 2018 se identifican 5 nuevos casos (15 años después de la inauguración). Todos los casos identificados en estos años se corresponden con apoyos ubicados en los estribos. Pero solo sobre los estribos, en donde la primera junta Gerber se ubica a 120 metros de la junta del estribo (46 m + 60 m + 14 m). En los estribos opuestos, donde los apoyos no presentan problemas de desplazamiento de lámina de teflón, la primera junta Gerber se ubica a 166 m de la junta del estribo (46 m + 60 m + 60 m).

Con respecto a la ubicación y al entorno de los puentes llamados “sobre las islas”, en la Conexión Rosario – Victoria, se puede decir que son una serie de 12 puentes con luces de 60 m de múltiples tramos de igual tipología estructural, que permitieron la materialización de la Ruta Nacional 174, a lo largo de una llanura de pastizales recorrida por una serie de canales o brazos del delta del Paraná. Estos puentes son de HºAº postesados, y fueron construidos con la misma metodología de cimbras deslizantes o móviles. La identificación de los puentes es la siguiente.

Puente	Puente
ZA-Ceibo Victoria	ZH-La Camiseta 2
ZB-Carbón Chico	ZI-Barrancoso
ZC-Carbón Grande 1	ZJ-Banderas
ZD-Carbón Grande 2	ZK-San Lorenzo
ZE-Paranacito Victoria	ZN-Zanja La Zorra
ZG-La Camiseta 1	ZO-Paranacito Rosario

Tabla 1. Puentes sobre las Islas

En el sentido longitudinal, el tablero está conformado por tramos de 120 m, conformando vigas continuas empotradas en sus dos pilas intermedias, con articulaciones en los tramos adyacentes al empotrado. Las articulaciones están ubicadas en el punto de momento nulo formando sistemas independientes unos de otros, que solo transfieren corte mediante las articulaciones Gerber.

El paso siguiente fue determinar qué acciones sobre los puentes podrían generar tales desplazamientos y evaluar su persistencia e intensidad.

Durante el desarrollo de las tareas de inspección se pudo notar cierta persistencia de vientos de moderada velocidad con eventuales ráfagas y que los camiones cuando

transitan sobre los puentes inducen vibraciones en el sentido lateral perceptibles para las personas. Dado que la naturaleza de la trayectoria de circulación de un camión no es perfectamente lineal, sino en vaivén o serpenteante, al ser este comportamiento sumamente complejo, muy laborioso de modelar, se propone para su caracterización y evaluación la determinación de las fuerzas que genera una maniobra de sobrepaso (No permitida, solo teórica) o maniobra de evasión de un posible obstáculo en el carril ya que los radios de curvatura que se producen en uno y otro caso son del mismo orden.

El bamboleo en los camiones es algo normal y habitual debido a que poseen su centro de gravedad muy alto, y la superficie del pavimento no está perfectamente nivelada ya que presenta irregularidades. Otro factor que lo genera es el hecho de que cuando dos camiones que circulan en sentido contrario se cruzan, se generan zonas de presión y depresión que hacen que el camión se mueva lateralmente.

Se evalúa primero el efecto que producen sobre el puente solo las fuerzas de empuje del viento sobre un camión y la fuerza que genera la maniobra de un camión sobre el puente con cierta trayectoria. Se emplearon ecuaciones que nos permitieron determinar cómo varían estas en el tiempo. El hecho de determinar solo las fuerzas de empuje de viento sobre el camión y no sumar el empuje sobre la cara del puente es solo a los efectos de evaluar como es la dinámica de una fuerza horizontal que se mueve por el tablero a una cierta velocidad. Luego se evaluaron las fuerzas de empuje de viento sobre la cara de los puentes.

El vehículo elegido para los análisis se considera circulando a velocidad constante y su geometría responde a una tipología típica de camiones que circulan por la ruta. Se busca visibilizar el tema de estudio, que es identificar la naturaleza del movimiento de la junta Gerber y junta de estribo. Esto se logra con vehículos de gran porte (peso considerable y de mayor superficie expuesta al viento).

Luego de haber determinado el nivel de vibraciones que generan estas dos situaciones fue necesario hacer una estimación de vibraciones generadas por efecto de vórtices de Von Kármán y sucesión de ráfagas de viento. Esto es debido a que el nivel de amplitud de las oscilaciones generadas por el efecto solo de camiones circulando por la calzada no terminan de explicar los desplazamientos de láminas de teflón observados.

Para estos análisis se eligió la estructura del puente **Zanja La Zorra** considerando la totalidad del puente en una longitud suficiente para evaluar solo la primera junta Gerber y estribo del lado Rosario. El amortiguamiento se adoptó en un valor típico del 5%.

Se realiza un análisis tiempo-historia donde se discretiza espacialmente la posición del camión a medida que este se va desplazando. Esto significa que las fuerzas que el camión ejerce sobre el puente se van asignando a distintos estados de carga en distintas posiciones sobre el puente, y se aplican a la estructura en correspondencia con la posición que adopta el camión en cada intervalo de tiempo analizado. Para cada posición del camión, en el intervalo de tiempo estudiado, se hace variar la carga

en el tiempo. Finalmente se hace un análisis en etapas sucesivas donde el análisis en el tiempo de cada etapa o estado de carga comienza a ser analizado a continuación del estado de carga anterior. Las condiciones de desplazamiento, velocidad y aceleración, al final de una ventana de tiempo estudiada para una posición del camión “estática” a lo largo de su trayectoria, son las condiciones iniciales de la próxima ventana de tiempo analizada, donde el camión se encontrará en una nueva posición a lo largo del puente. Se consideran deltas de tiempo muy pequeños en el orden de los 0.05 segundos para tratar de aproximar lo mejor posible el hecho de que el vehículo se mueve y la carga varía en el tiempo.

Cada estado de carga (i) toma las condiciones del estado anterior (i-1). Al final del análisis de cada delta de tiempo (i) se hacen cero las fuerzas asignadas para el estado de carga (i). De esta forma se evita, la acumulación de fuerzas horizontales y se puede avanzar en el tiempo analizando un solo vehículo que “desaparece” y “aparece” nuevamente en una nueva posición.

Se analizan los registros de desplazamiento en la juntas de estribos por cambios térmicos en la totalidad de los puentes para evaluar que los desplazamientos observados sean los esperados y así poder identificar que no haya ningún tipo de bloqueo o impedimento del libre movimiento del apoyo. Esto se complementó con la observación del estado del hormigón de las vigas en la zona de apoyo.

Tipología de puentes y Apoyo tipo POT – Identificación de apoyos con desplazamiento de la lámina de PTFE (Teflón)

Los presentes puentes están conformados por dos vigas principales de altura variable (2.60 m en zona central y constante en la mayoría del tramo y 4.60 m como valor máximo en correspondencia con las columnas) y espesor promedio de 61.5 cm, que dan apoyo a un tablero de 11.80 m de ancho. Los tramos extremos, contra los estribos son de 45 m de luz, y los intermedios de 60 m. Estos tramos se apoyan en pares de pilotes de hormigón armado colados in situ con camisa perdida en los primeros metros superiores, con diámetros: 1.80 m y 2.00 m, fundados a 40 m de profundidad.

El tablero presenta una losa de hormigón con espesor variable 30 cm / 22.5 cm, con ancho de calzada de 8.30 m con un carril por mano, defensas de hormigón y veredas laterales en voladizo.

Estos puentes presentan cantidad de tramos acordes al ancho del canal que atraviesan, manteniendo la misma configuración estructural. Las juntas de dilatación se presentan cada 120 m, típicas.

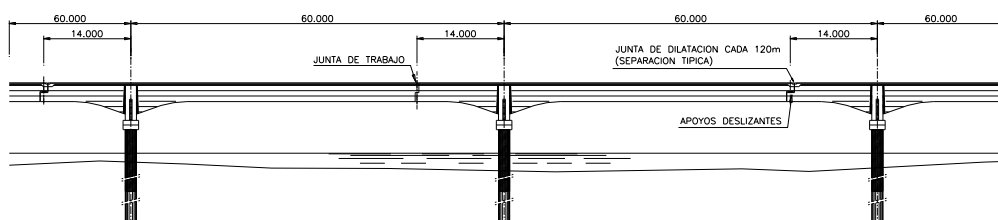


Figura 1. Secuencia de tramos típica – Juntas de dilatación y juntas de trabajo

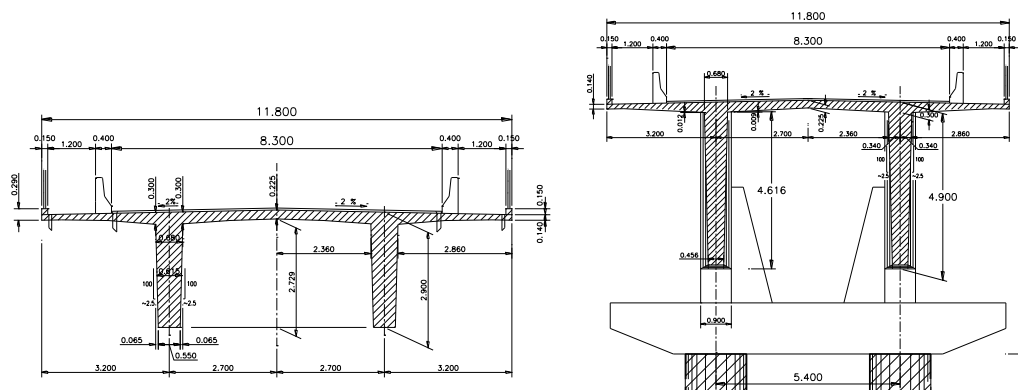


Figura 2. Sección transversal del tablero – Tramo central y zona de apoyo

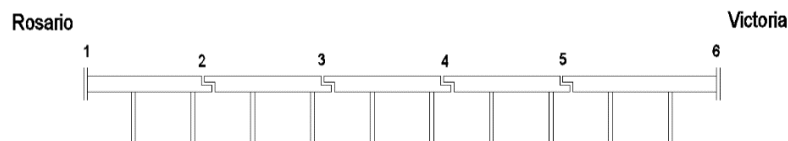


Figura 3. Esquema de tramos del Puente Zanja la Zorra (11 tramos)

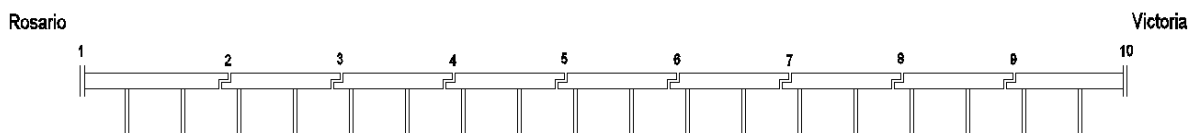


Figura 4. Esquema de tramos del Puente Paranacito Victoria (19 tramos)

El principio de funcionamiento de los dispositivos de apoyo se basa en confinar un disco de elastómero de alto desempeño que al ser sometido a rotaciones respecto a cualquier eje, tiene la capacidad de distribuir la compresión resultante del peso de la superestructura. Permite el desplazamiento tanto en la dirección horizontal longitudinal como lateral.

Las posibilidades de rotación derivan de la deformabilidad del elastómero (policloropreno), ampliamente conocido como neopreno, confinado en un contenedor cilíndrico (parte inferior del apoyo) y comprimido por un pistón guiado en el interior del mismo (parte intermedia del apoyo); las posibilidades de desplazamiento son garantizadas por la presencia de una placa superior móvil, con la cara inferior revestida por una plancha de acero inoxidable, que puede deslizarse sobre una superficie plana de PTFE presente sobre la cara superior del pistón. El PTFE (politetrafluoroetileno) es un plástico técnico de alto rendimiento famoso por su efecto antiadherente.

Se aclara que el movimiento del apoyo en si es multidireccional, teniendo en cuenta que las posibilidades de movimiento del apoyo en dirección longitudinal, fueron definidas de modo que no fueran superadas bajo condiciones normales de servicio. El apoyo se completa con un protector de polvos que envuelve el apoyo e impide el ingreso de partículas finas.

La posibilidad que tiene una cara del apoyo (superior) de desplazarse con respecto a la otra (inferior) en la dirección lateral está limitada por la luz disponible definida en proyecto en la juntas de dilatación del tablero. Esta luz es del orden de los 2 mm. Ver

Figura 7. Las placas colocadas para controlar el contacto lateral en la junta son de plomo adicionado con antimonio.

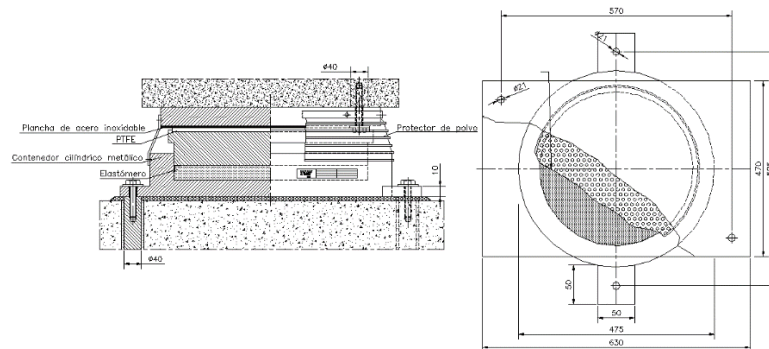


Figura 5. Detalle de Apoyos POT. Izquierda: corte. Derecha: planta – Plano de proyecto

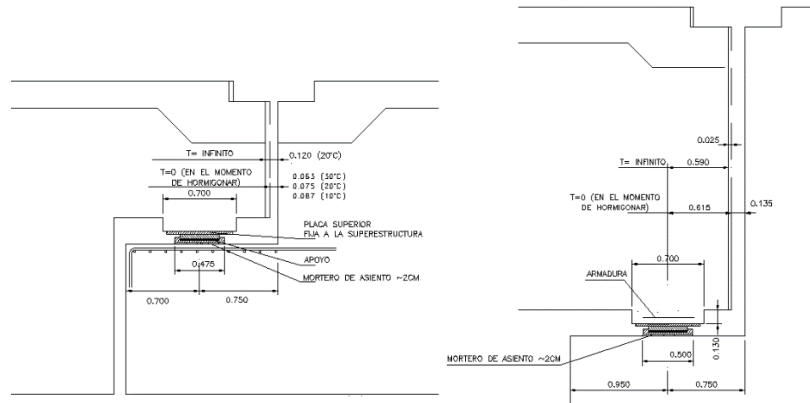


Figura 6. Detalle de apoyo en Articulación Gerber y en apoyos de estribos – Planos de proyecto - Corte

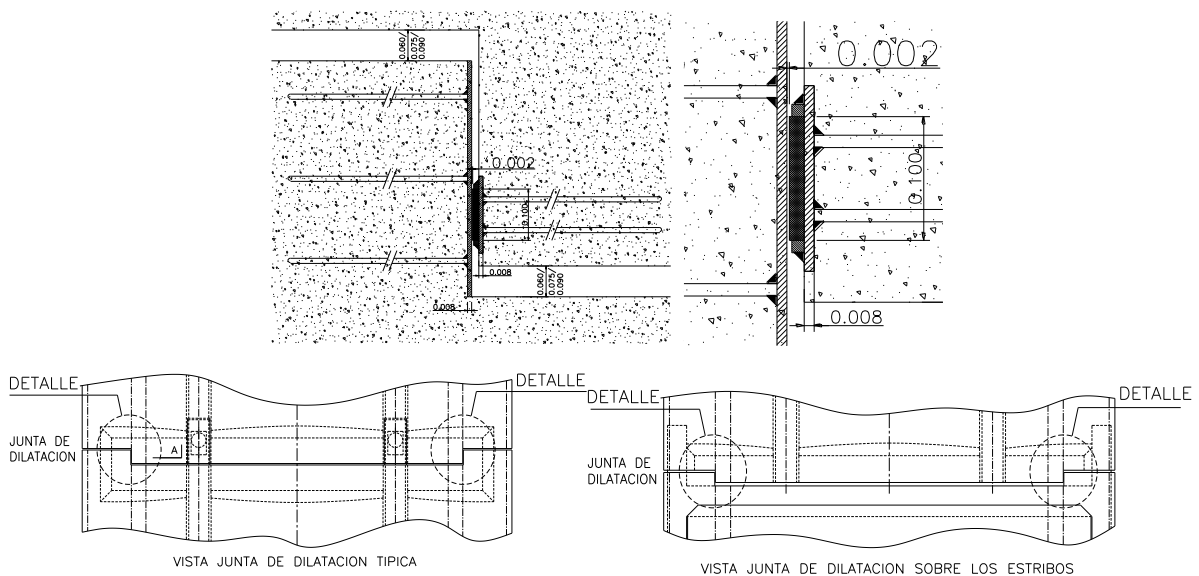


Figura 7. Detalle de apoyo lateral en articulación Gerber y en Estribos –Vista superior juntas de dilatación en articulación Gerber y en Estribos - Planos de proyecto

Para el relevamiento de los apoyos se realizó un recorrido de la zona accesible y no accesible. Se relevaron dos tipos de apoyos, los correspondientes a las Articulaciones

Gerber para los cuales se utilizó una cámara adosada a un brazo, y los apoyos de los estribos con inspección visual directa.

Las campañas permitieron identificar los siguientes casos de apoyos tipo POT donde la lámina de teflón presenta distintos grados de desplazamiento fuera del apoyo:

- 1- *Apoyo 10, estribo Este, aguas arriba, del puente ZE-Paranacito-Victoria. Campañas 2014-2015, 2017, 2018 y 2020. Desplazamiento de teflón.*
- 2- *Apoyo 8, estribo Este, aguas arriba, del puente La Camiseta 1. Campaña 2020. Desplazamiento de teflón, identificado en campaña 2018, sin incremento.*
- 3- *Apoyo 7, Estribo este, aguas arriba, del puente Barrancoso. Campaña 2020. Desplazamiento de teflón (Identificado en 2018) que se mantiene.*
- 4- *Apoyo 7, Estribo este, aguas abajo, del puente Barrancoso. Campaña 2020. Desplazamiento de teflón (Identificado en 2018) que se mantiene.*
- 5- ***Apoyo 1, Estribo Oeste, aguas abajo, del puente Zanja La Zorra. Campaña 2020. Desplazamiento de teflón persiste (El desplazamiento se encuentra como en campañas 2015 a 2018). Caso piloto estudiado en este trabajo.***
- 6- *Apoyo 1, Estribo oeste, aguas abajo, del puente Paranacito Rosario. Campaña 2018. Desplazamiento de teflón. (Identificado en 2018)*
- 7- *Apoyo 1, Estribo oeste, aguas arriba, del puente Paranacito Rosario. Campaña 2020. Desplazamiento de teflón empujando la pollera de protección. (Identificado en 2018).*

El catálogo fotográfico muestra un buen estado de mantenimiento de las estructuras de hormigón. No se observaron fisuras apreciables a la vista en las superficies de hormigón de las vigas en las zonas en torno a los apoyos en juntas Gerber y estribos.

Se identifican 7 casos de aparatos de apoyo con desplazamiento de la lámina de teflón fuera del mismo. Estos desplazamientos, en 6 de los casos son leves. En el caso del Puente La Zorra se observa un gran desplazamiento de la lámina en uno de los apoyos ubicado sobre el estribo Oeste, Aguas abajo.



Figura 8. Detalle del apoyo – Leve desplazamiento de la lámina de PTFE en estribo Este, Aguas arriba, en el Puente Paranacito Victoria – Desplazamiento lateral y longitudinal



Figura 9. Apoyo 1, Estribo oeste, aguas abajo, del puente Paranacito Rosario. Campaña 2018. Leve desplazamiento lateral de la lámina de PTFE. (Identificado en 2018)



Figura 10. Detalle del apoyo – Gran desplazamiento lateral de la lámina de PTFE en estribo Oeste, Aguas abajo, en el Puente Zanja la Zorra

En la figura 10 se aprecian, en la parte inferior del teflón, marcas sistemáticas que podrían asimilarse a pequeños escalones de desplazamiento que fue sufriendo esta lámina.

Efectos térmicos sobre los puentes – Medición de carrera de juntas

En cada campaña de inspección, junto con la observación visual de los puentes, se analizaron los registros de desplazamiento en las juntas Gerber y en las juntas de los estribos de todos los puentes por cambios térmicos. Cada año se tomaron lecturas de carreras de juntas, tanto en época invernal, como estival. Para la totalidad de los puentes, estos resultados fueron satisfactorios. La tendencia general de los desplazamientos en la zona de juntas se mantiene lineal respecto a las temperaturas extremas.

Se puede observar en las juntas extremas, que con los años, los estribos, por efecto del fenómeno de fluencia lenta y/o consolidación del material de relleno presentan una deflexión por flexión de los pilotes que tiende a desplazarlos hacia el centro del cauce. Este fenómeno es singular en cada uno debido a la longitud en voladizo y las particularidades que presentan los rellenos que se fueron agregando para conformar los accesos. No se observa en ningún caso, algún tipo de bloqueo del apoyo. Se muestra como ejemplo el caso del puente Carbón Grande 2 (ZD) que no presenta problemas de desplazamientos de las láminas de teflón fuera de sus apoyos. Se midieron sobre una de sus juntas extremas en el estribo del lado Rosario (ZD1) desplazamientos permanentes del orden de los 10 mm. Este comportamiento se da en la mayoría de los puentes, en unos de forma más marcada que en otros.

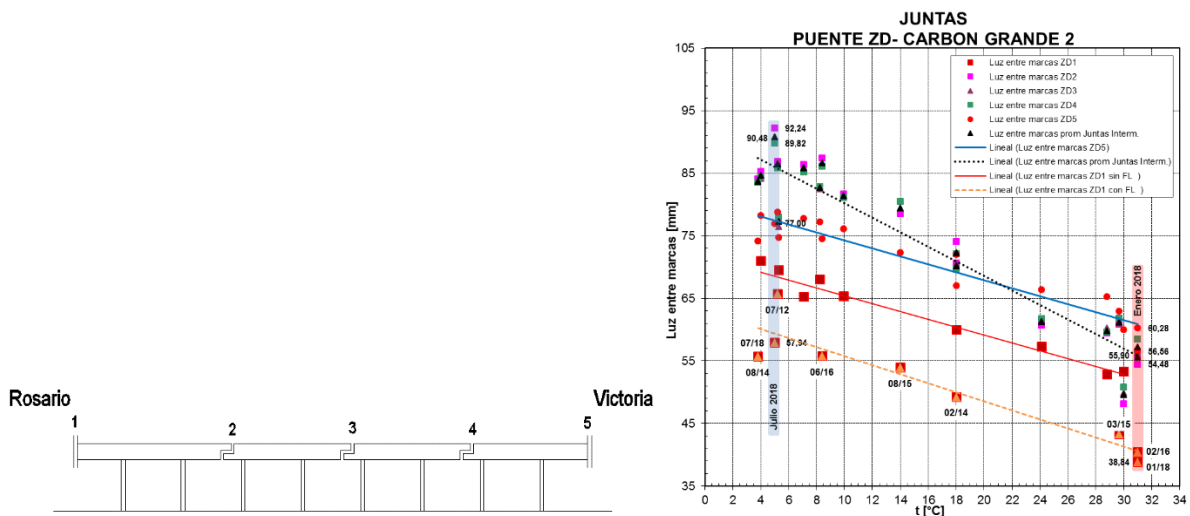


Figura 11. Carrera de juntas del Puente ZD (Carbón Grande 2). En el caso de la junta ZD1, sobre el estribo Oeste, se observa un acortamiento permanente del orden de los 10mm.

En general se pudo observar sobre la calzada, que las juntas de dilatación se encuentran en buen estado de conservación.



JD2-PTE. ZA-CEIBO VICTORIA-2018



JD5-PTE. ZB-CARBÓN CHICO-2018

Figura 12. Juntas de dilatación con relleno granular en canaletas de elongación de los paños extremos

Identificación de los fenómenos que generan vibraciones laterales en el tablero en la zona de juntas

Como se mencionó en la introducción, se evalúan primero dos acciones puntuales que generan vibraciones horizontales laterales al eje del camino. Por un lado, la acción del viento sobre un vehículo de gran porte o gran superficie de exposición al viento que circula, afectado por el viento transversal, a una velocidad máxima permitida de circulación de 80 km/h.

En el caso de la acción del viento, se considera una situación teórica donde el viento incide en forma transversal al puente e impacta sobre la superficie o cara lateral de un camión en circulación, adoptando como representativo un camión con semirremolque. Esto es a los efectos de estudiar solo la componente de fuerza de arrastre de viento transversal al camino solo generada por el camión en movimiento.

En el caso de un camión realizando una maniobra de cambio de carril, ya sea por una maniobra de sobrepaso, que si bien, está prohibida, puede suceder, o una maniobra de evasión de un objeto en la calzada, se generan una serie de fuerzas centrífugas debido a la inercia de la masa del camión por el cambio de dirección.

Ambos acciones sobre la estructura del puente son de tipo dinámicas (variando en intensidad a lo largo del tiempo) y con cambios en su posición en el espacio en trayectoria lineal (análisis del viento) y curva (sobrepaso).

Camión tipo – Caracterización geométrica

Para evaluar las vibraciones generadas lateralmente por ráfagas de viento sobre vehículos que circulan sobre el puente, y por maniobras de evasión, se estudió la composición del tránsito de gran porte que circula por los puentes.

Se han podido identificar tres vehículos pesados típicos:

- Camión granelero con configuración de ejes 11-12 (Tipo 17)
- Camión semirremolque con configuración de ejes 113 (Tipo 10)
- Camión de combustible con configuración de ejes 122 (Tipo 11)

A continuación se muestra las configuraciones mencionadas:

N°	TIPO DE VEHÍCULO	CONFIGURACIÓN N° DE EJES	DIMENSIONES MÁXIMAS			PESO MÁXIMO (t)	Relación POT/PESO (CV/t) mín.
			LARGO (m)	ANCHO (m)	ALTO (m)		
10		S1 - D1 - D3	18,60	2,60	4,30	42,00	4,25
11		S1 - D2 - D2	18,60	2,60	4,30	42,00	4,25
17		S1 - D1 - D1 - D2	20,00	2,60	4,30	45,00	4,25

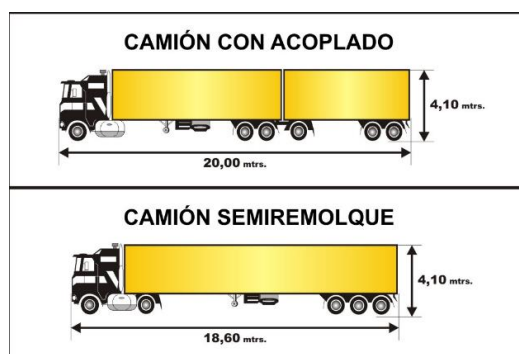


Figura 13. Principales tipologías de camiones que circulan por los puentes – Dimensiones

Se presentan los antecedentes de tránsito, del contador permanente que tiene la DNV en el tramo en estudio donde se ubican los puentes sobre las islas:

Serie Histórica									
Año	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
TMDA	6265	6694	6328	6365	4350	5654	6453	6380	6090

Tabla 2. TMDA desde el año 2016 al año 2024. – Distrito 17 Entre Ríos – Ruta 174

Promedio Anual 2024		
Autos y Ctas. 63,4	S/A 4	Bus-C/A-Semi 32,6

Tabla 3. Porcentaje de livianos y pesados.

Se observa una alta participación de los vehículos pesados (32 %). De acuerdo a los datos se puede estimar que, durante los últimos 10 años, utilizaron los puentes 2000 camiones pesados por día, de los cuales 1000 son del tipo granelero con acoplado, y la otra mitad del tipo semirremolque, que es utilizado también para el transporte de granos, como así también de cargas generales y combustibles.

A los efectos de la modelación se utiliza la siguiente geometría del camión:

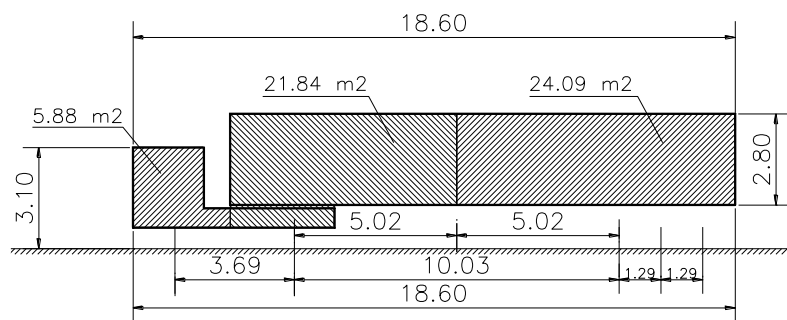


Figura 14. Geometría del camión adoptado - Semirremolque

Metodología – Modelado de la estructura y Representación matemática de los Fenómenos para obtener las respuestas de la estructura: Desplazamientos y aceleraciones horizontales

En el caso del viento, se lo evalúa como una fuerza de empuje con una variación de su intensidad en el tiempo que recorre una cierta trayectoria recta por la calzada del puente. Para esto, se consideró la ocurrencia de un fenómeno de ráfaga. La misma fue representada mediante una variación de la intensidad de viento, en una gráfica Velocidad-Tiempo, con la forma de una pelota de Rugby.

Para la representación u obtención de las fuerzas generadas por un camión que realiza un cambio de carril tanto para sobrepasar o para evadir un obstáculo en la calzada, se idealiza una maniobra de sobrepaso u evasión de trayectoria parabólica. Un camión con semirremolque (con sus correspondientes pesos por eje), necesita una distancia de 500 metros para salirse del eje del carril por el que circula, alcanzar el centro del eje del carril de la mano contraria y volver a la posición inicial alineado nuevamente con la trayectoria que traía antes de iniciar la maniobra. Se considera que el camión circula a 100 km/h y sobrepasa otro camión que circula a 80 km/h en el caso teórico.

Las fuerzas de inercia centrífugas dependen de la masa del vehículo que se desplaza y del radio de curvatura de la trayectoria que desarrolla el vehículo. En este caso puntual de una trayectoria de inicio y fin en el espacio de 500 metros a lo largo del tablero del puente, los radios de curvatura son variables, pero se puede considerar que la variación es insignificante en términos del análisis que se está realizando ya que esta no es relevante.

Caracterización del viento en zona de implantación de los puentes

El comportamiento plurianual de los vientos sobre el Cruce Rosario/ Victoria se verifica en la base de los registros de las estaciones meteorológicas que rodean la ciudad de Rosario.

Se pueden apreciar en estos datos, durante los años que se sucedieron desde la construcción de este Cruce, que han existido dos tipos de fenómenos meteorológicos:

Vientos fuertes que dejaron huellas significativas en la ciudad al arrancar árboles y derribar tinglados y otros daños, y los vientos frecuentes de mediana intensidad que se presentan y se mantienen por varias horas con la singularidad, que no tienen una velocidad constante, sino que son arrachados (se componen de un conjunto de ráfagas de viento de mediana intensidad que se van sucediendo a lo largo de estas horas, en forma discontinua).

Los registros ordenados muestran que este tipo de vientos se generan en forma sistemática en dos momentos del año; febrero/ marzo, y septiembre/ octubre. El rango de velocidades oscila entre 40 a 60 km por hora, para estos vientos frecuentes. Los vientos fuertes presentan un rango de velocidades de 80 a más de 100 kilómetros por hora.

Cuando el viento es arrachado, los conductores de camiones/colectivos realizan pequeños movimientos del volante para evitar que el viento los desvíe del carril por el cual circulan, esto naturalmente genera un bamboleo del camión, su acoplado o semi.

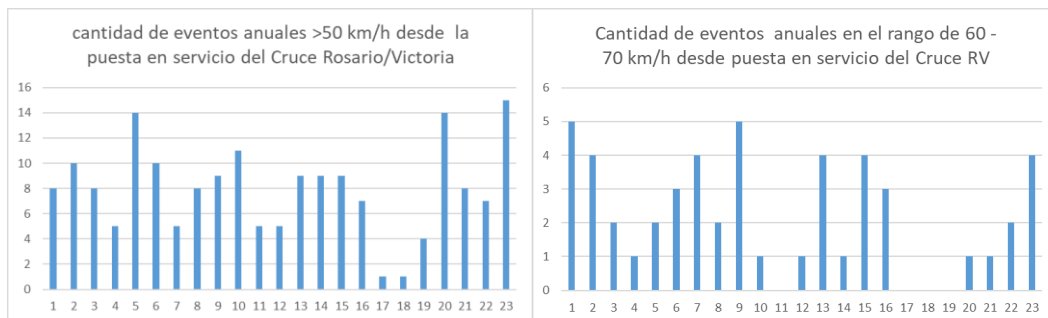


Figura 15. Frecuencias de eventos por año en los últimos 23 años para distintos rangos de velocidades del viento

año	Velocidad máxima de ráfagas de viento en km/h sucedidas en cada mes de cada año											
	ene	febr	mar	abril	mayo	junio	julio	agos	sept	oct	nov	dic
2011											100	
2012										90		
2023									87			
2024												
2025		102	88					46	61	82		
2026			102		120							

Tabla 4. Concentración de eventos con velocidades máximas de ráfagas de viento en los meses Feb/Mar y Sep/Oct

Modelado de fenómeno de ráfaga: “Esquema Balón de Rugby”

La velocidad del viento, que se asume circula en forma ortogonal al puente, que actúa sobre un camión que circula a 80 km/h, se incrementa desde un valor de base U, cuando este se encuentra ingresando al puente desde el estribo Oeste, hasta un valor

pico con un valor cincuenta por ciento mayor ($1.50U$) para representar la ráfaga de viento. Se considera que la ráfaga sucede en un periodo de tiempo del orden de los 7 segundos, luego del cual, la velocidad del viento vuelve a ser U . La variación de la velocidad del viento por la ráfaga, se hace variar con una impronta llamada en la literatura como balón de Rugby. Para el análisis se toman incrementos del tiempo Δt del orden de los 0.05 seg.

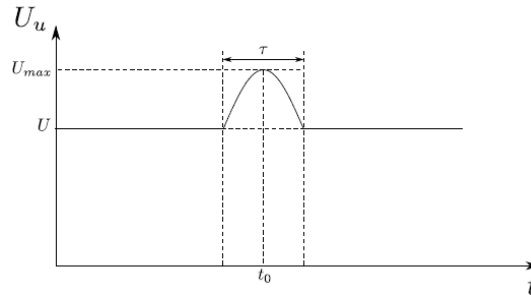


Figura 16. Esquema de la velocidad de viento durante una ráfaga tipo BALON DE RUGBY

La ecuación que representa la variación de la velocidad del viento durante la ocurrencia de una ráfaga es:

$$U_u = U + (U_{max} - U) \sin \left[\frac{\pi}{\tau} \left(t - t_0 + \frac{\tau}{2} \right) \right] \quad \text{para} \quad t_0 - \frac{\tau}{2} < t < t_0 + \frac{\tau}{2} \quad (1)$$

La presión que ejerce el viento sobre los laterales del camión que circula sobre el puente se describe a continuación:

Velocidad del viento $V = 50 \text{ km/h}$ (13.90 m/seg)

Factor topográfico $K_{zt} = 1.00$

Factor de direccionalidad $K_d = 0.85$

Factor de exposición por altura $K_z = 1.078$

Presión dinámica $q_z = 0.613 * K_z * K_{zt} * K_d * V^2 = 11 \text{ kg/m}^2$

Factor de Ráfaga $G = 0.85$

Coefficiente de arrastre aerodinámico $C_f = 1.30$

Presión efectiva p (para $V 50 \text{ km/h}$) = $G * C_f * q_z = 12.2 \text{ kg/m}^2$

Para una superficie lateral de exposición del camión de 51.80 m^2 . La fuerza resultante es 630 kg .

Para el análisis se toman incrementos del tiempo Δt del orden de los 0.06 seg. La maniobra completa se divide en un total de 12 pasos de análisis.

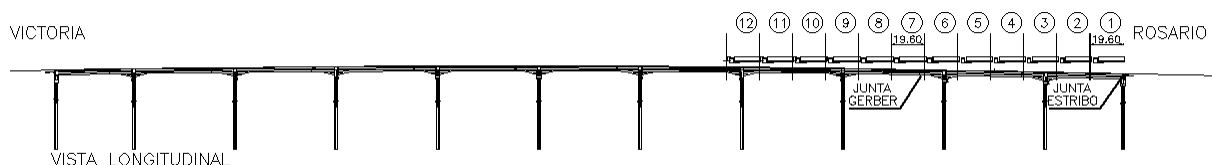


Figura 17. Imagen representativa de los pasos analizados en la modelación del recorrido del camión

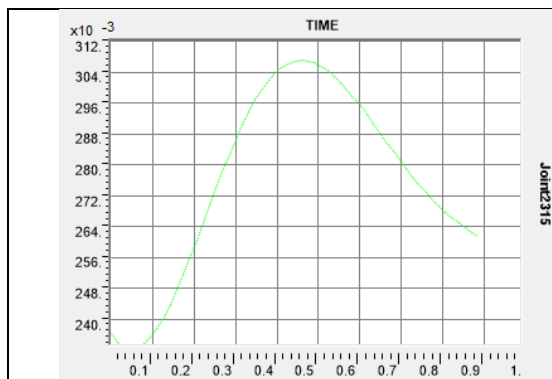


Figura 18. Desplazamiento lateral junta Gerber 1 – Viento sobre un camión con semirremolque – Paso 7. 0.30 mm

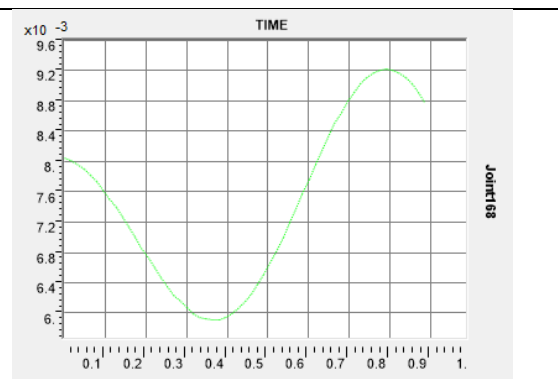


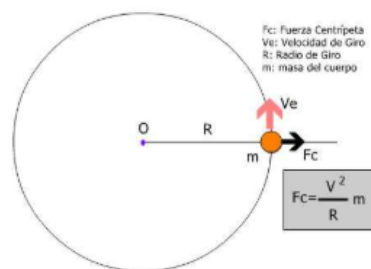
Figura 19. Desplazamiento lateral junta estribo Oeste – Viento sobre un camión con semirremolque – Paso 5. 0.01 mm

Trayectoria de evasión a obstáculo o sobrepaso (No permitida) – Fuerzas de Inercia

Se evalúan las vibraciones transversales al puente que genera un camión con semirremolque sobre las juntas al salirse de su trayectoria en una maniobra de evasión o sobrepaso. Como se dijo previamente la geometría de la maniobra está definida por una parábola de 500 metros con un camión que circula a 100 km/h (velocidad solo adoptada a los efectos de determinar acciones sobre el puente).

El desplazamiento horizontal para salirse del eje del carril por el que circula y alcanzar el eje del carril de la mano contraria es 4.15 m. El camión pesa 45 tn. Se destaca que la fuerza centrífuga depende del Radio de curvatura de la trayectoria, que en este caso se mantiene en el orden de los 7500 metros. La componente de la fuerza centrífuga en la dirección transversal al puente (su proyección) se puede adoptar igual al valor del vector fuerza centrífuga, ya que los ángulos entre estos dos vectores son muy pequeños, del orden del grado.

$$F_c(x) = \frac{8000 \cdot P \cdot V_1^2 \cdot Y}{D^2 \cdot \left[1 + \frac{16Y^2}{D^4} (D - 2x)^2 \right]^{3/2}}$$



(2)

Para un valor de P, de 45 tn, V1 de 100 km/h, Y de 4.15 m y D de 500 m, resulta un valor de $F_c(x)$ que varía muy poco con la distancia ya que el radio de curvatura prácticamente se mantiene constante. F_c se puede asumir constante a los fines prácticos, y en el orden de los 470 kg.

Para el análisis se toman incrementos del tiempo Δt del orden de los 0.05 seg. La maniobra completa se divide en un total de 20 pasos de análisis.

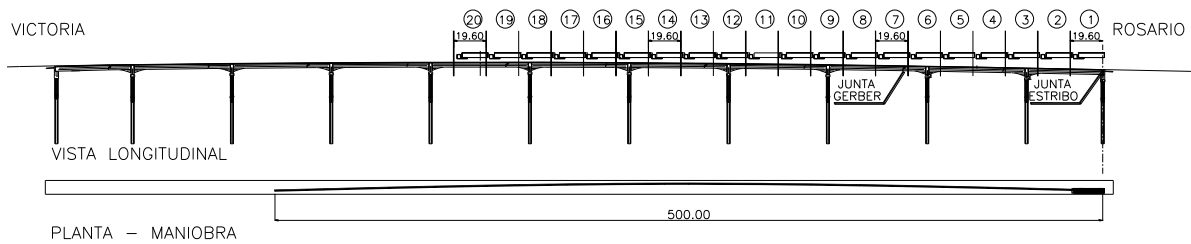
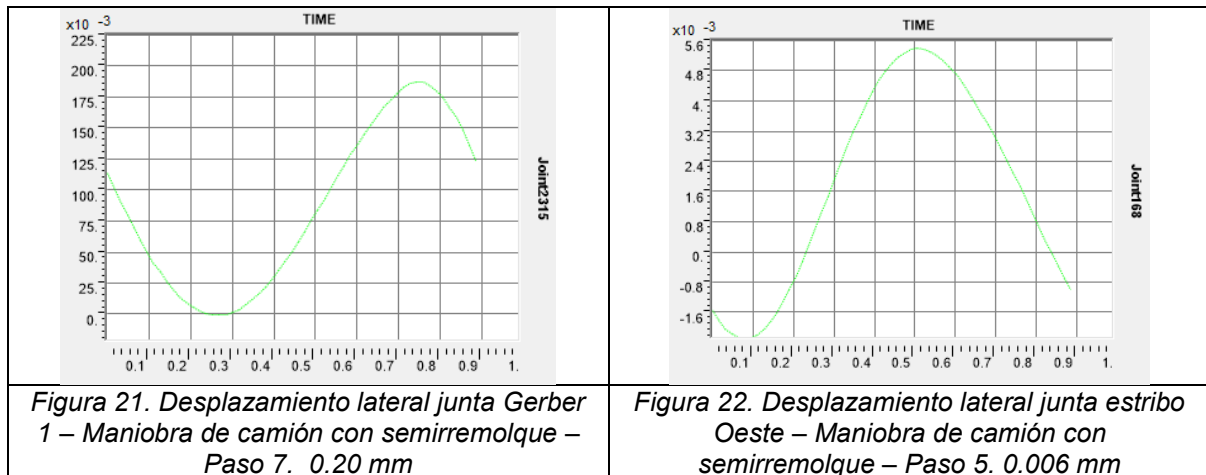


Figura 20. Imagen representativa de los pasos analizados en la modelación de la maniobra del camión



Modelo de la estructura

Para la elaboración del modelo del puente se utilizan los planos de proyecto. Se emplean elementos finitos tipo Shell. Las juntas Gerber y juntas de estribos se modelan con la liberación de los grados de libertad de desplazamiento y giro correspondientes. Solo se modelan 8 tramos del puente de 11 tramos, ya que solo se observa el desplazamiento horizontal de la primera junta sobre el estribo y la segunda junta sobre la junta Gerber. Para la modelación del puente se adoptan valores del módulo de elasticidad del hormigón en base a planos de proyecto: Hormigón de Superestructura H-38 y Hormigón de Infraestructura (Pilas y Estribos) H-30. Para el caso del puente Zanja la Zorra, los pilotes son de diámetro 1.80 m.

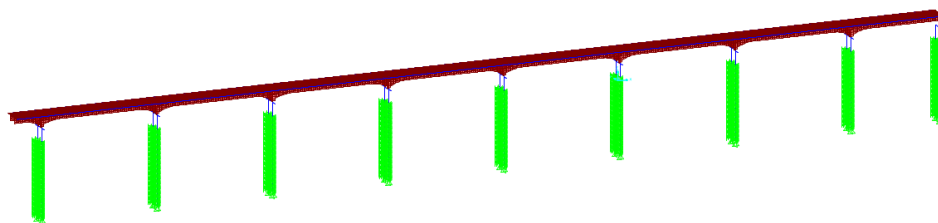


Figura 23. Modelo de elementos finitos

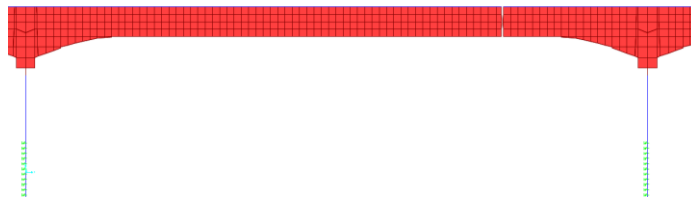


Figura 24. Modelo de elementos finitos – Detalle Junta Gerber

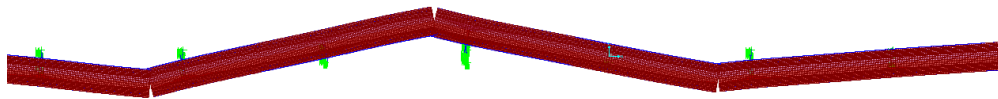


Figura 25. Forma modal del primer modo de vibración del modelo del puente. Es lateral.

Periodo $T = 1.11$ seg

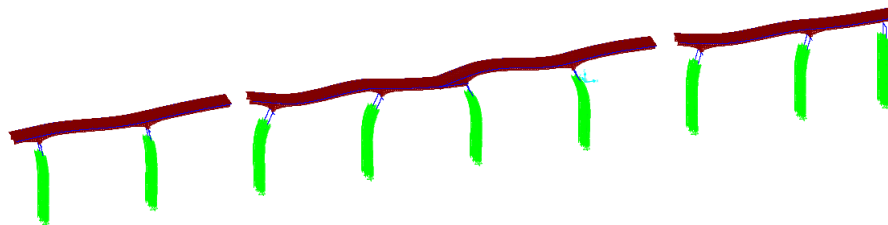


Figura 26. Forma modal del segundo modo de vibración del modelo del puente. Es longitudinal. Periodo $T = 1.11$ seg

En cada ventana o paso de análisis donde la posición del camión se mantiene fija, las funciones que permiten variar tanto la acción del viento como la fuerza centrífuga en el tiempo se muestra a continuación. Se hace cero dicha función al final del periodo delta de tiempo analizado para no acumular fuerzas horizontales a lo largo del análisis.

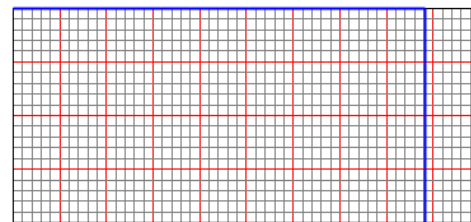
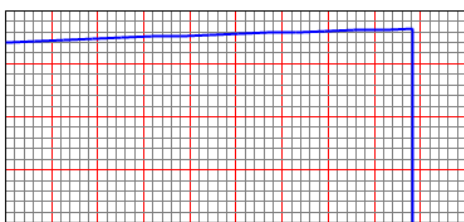


Figura 27. Funciones de forma utilizadas para el Viento y para la Maniobra del camión

Flexibilidad lateral - Evaluación de posible entrada en resonancia por frecuencias sostenidas debido rachas de viento y/o vórtices de Von Kármán

Como se puede observar en los resultados de la modelación. El primer modo de vibración del puente es lateral y con un periodo de vibración del orden del segundo ($T = 1.00$ seg), lo que pone a la estructura dentro de un rango identificado como flexible.

Lo que puede haber sucedido es que las estructuras se vieron sometidas a rachas de viento sostenidas con frecuencia similar a la frecuencia natural del primer modo de vibración de la estructura y/o efecto sostenido de vórtices de Von Kármán.

La posibilidad de que esto haya sucedido se basa en que, analizando solo las vibraciones inducidas por la circulación de vehículos pesados que origina fuerzas sobre el puente por empuje de viento sobre el mismo vehículo y/o maniobras, no se logra explicar el nivel de desplazamiento de las láminas en sentido lateral observado, en un nivel muy superior al permitido por la junta en el tope lateral de tan solo 2 mm. Lo que se presume es que, en algún momento del servicio, la estructura entró en resonancia y este evento fue algo puntual, ya que los desplazamientos de láminas de neopreno una vez que fueron identificados, con los años no sufrieron desplazamientos mayores, lo que significa que lo que causa el daño no es de naturaleza progresiva, sino que se produjo a durante la ocurrencia de ciertos eventos puntuales. La forma modal del primer modo de vibración, es lateral y con los máximos desplazamientos en la zona de juntas. Cuando las estructuras entran en resonancia, los movimientos son sostenidos, cíclicos y esto se convierte en una fuerte hipótesis para explicar los desplazamientos. Se observa en los desplazamientos de las láminas que los principales desplazamientos son en el sentido transversal.

Para evaluar esta posibilidad se determina primero para qué rango de velocidades del viento es posible que se generen los vórtices, dada la presente geometría de puente. La altura total del tablero en casi todo su desarrollo es de 3.70 m (sumando la altura de viga, el espesor de la carpeta y la defensa).

Se aplica Ecuación de Strouhal.

$$St = \frac{f_s D}{U} \quad (3)$$

Tomando un valor de St de 0.15, altura del puente de 3.70 m, y una frecuencia de 1 Hertz resulta una velocidad de viento de 85 km/h.

En la observación de los registros de vientos en las estaciones meteorológicas hubo varios vientos de 80 km/hora o mayores, con duración prolongada.

Los cambios de presión fluctuante de arrastre en los laterales del puente que generan pulsos por la acción de vórtices de Von Kármán se pueden estimar en valores con picos de presión y succión de 10 kg/m² y -10 kg/m² que se producen en forma sucesiva. El número de Reynolds resulta en el orden de 6x10⁶ indicando un flujo turbulento. En este tipo de flujo es válido considerar que el número St se mantiene en el orden de 0.15, y que la naturaleza de los vórtices es tal que estos se suceden con un contenido de frecuencias principal en torno al segundo.

Como resultado de la modelación de estos pulsos (+10 kg/m² y -10 kg/m²) se obtienen valores de desplazamiento lateral modelado en la primera junta Gerber del orden de los 4 mm para una secuencia de 60 segundos de análisis. En la junta de los estribos este desplazamiento modelado resulta en el orden de los 0.10 mm. La interpretación es la siguiente: Se aclara que el desplazamiento lateral total modelado

de la zona de junta Gerber es 4 mm, pero en términos relativos, entre la parte superior e inferior del apoyo, este no superará los 2 mm por los topes laterales, si durante la construcción se logró materializar ese gap tan reducido. En el caso del estribo, no hay contacto contra el tope. La deformación del tablero es muy similar a la del primer modo de vibración. En la junta del estribo se observa una rotación relativa entre la parte superior e inferior de los apoyos de 0.00003 radianes ($0^{\circ}0'6''$). En la primera junta Gerber se observa una rotación relativa entre la parte superior e inferior de los apoyos de 0.00018 radianes ($0^{\circ}0'37''$).

Para tener como referencia de marco, el desplazamiento lateral total para una presión estática de 150 kg/m² resulta para la primera junta Gerber 7 mm y para el estribo 2 mm. Vale aclarar que el desplazamiento total modelado de la zona de junta Gerber es 7 mm, pero en términos relativos, entre la parte superior e inferior del apoyo, este no debería superar los 2 mm por los topes laterales. En el estribo, hay contacto contra el tope. En la 1^{era} junta Gerber no se observa una rotación relativa entre las dos partes del apoyo, esto se confirma en la forma de la deformada. En la junta del estribo se observa una rotación relativa entre la parte superior e inferior del apoyo de 0.00016 radianes ($0^{\circ}0'33''$).

En los apoyos se presentan, frente al viento, componentes laterales de desplazamiento y giros.

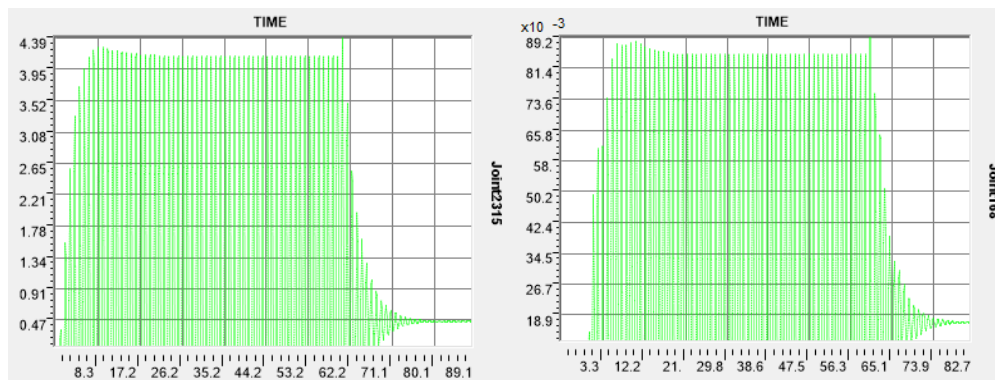


Figura 28. Oscilaciones en Junta Gerber y en Junta de Estribo. Solo se grafica la parte positiva de las oscilaciones

Se muestran a continuación las deformaciones laterales del tablero para la resonancia en un pico del ciclo, la forma modal del 1^{er} modo y la deformación estática por presiones de 150 kg/m² sobre la cara lateral del puente para medio puente.

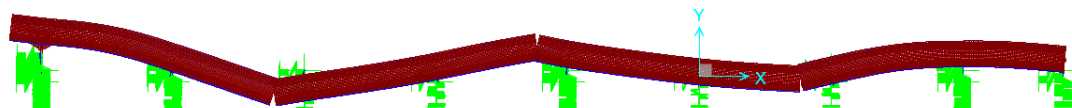


Figura 29. Deformación lateral en un extremo del ciclo por pulsos de +10 kg/m² y -10 kg/m²

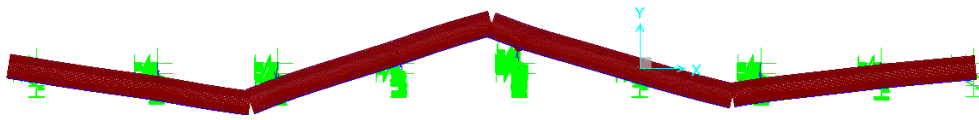


Figura 30. Forma modal del primer modo de vibración del modelo del puente - Lateral.



Figura 31. Deformación lateral del tablero (gráfica de **medio puente**) – 150 kg/m² – Indicación con flechas ubicación junta en estribo y 1era junta Gerber Lado Rosario Giro relativo entre dos partes del apoyo en el estribo: 0°0'33".

Mecánica de desprendimiento de vórtices y resonancia

El desprendimiento de vórtices en los tableros de los puentes al chocar el viento contra la sección transversal del tablero (usualmente de geometría no aerodinámica o "roma"), el flujo se separa y forma remolinos alternantes que generan fluctuaciones de presión a sotavento. En el borde de salida, los flujos separados se curvan y se desprenden alternativamente desde la parte superior e inferior del tablero, creando un patrón de estela escalonado conocido como calle de vórtices de von Kármán. Este fenómeno induce fuerzas aerodinámicas periódicas sobre el tablero, que pueden desencadenar vibraciones inducidas por vórtices (VIV) cuando una de las frecuencias de los desprendimientos coincide con una de las frecuencias naturales del puente.

El fenómeno de "Lock-in": A medida que la velocidad del viento aumenta y la frecuencia de desprendimiento de vórtices se acerca a una de las frecuencias naturales de la estructura, la vibración del tablero "captura" al fluido. Esto fuerza a los vórtices a desprenderse a la frecuencia natural del puente, amplificando el movimiento produciendo una oscilación sostenida y sincronizada con el riesgo de provocar una acumulación de "fatiga" a largo plazo en los elementos auxiliares.

Debido a que los sistemas Gerber utilizan tramos suspendidos conectados por articulaciones internas, la flexibilidad dinámica de estas uniones, combinada con el perfil romo de las vigas del tablero, los hace altamente susceptibles a las oscilaciones inducidas por el viento.

En el caso de los Puentes sobre las Islas, el tramo que apoya sobre el estribo tiene una longitud de 45 metros y el ancho del tablero es de 11,80 metros lo que significa una esbeltez transversal del tablero de 3,8.

La metodología constructiva con carro de avance en tramos hormigonados in situ, presenta ciertas dificultades para lograr los gaps laterales entre topes. Estas pequeñas diferencias de huelgo, a confirmar in-situ, explicarían la mayor amplitud de oscilación del tramo analizado, y la consecuencia de la expulsión parcial de la lámina de teflón como lengüeta que sobresale del POT.

Conclusiones

Se identifican 3 acciones que pueden favorecer desplazamientos de la lámina de neopreno de los apoyos hacia los laterales o en una dirección alineada con el eje de la calzada: Efectos térmicos que por cambios de temperatura en el ambiente generan la contracción o la dilatación del tablero a lo largo del eje del camino, las vibraciones laterales que producen los camiones que circulan por el puente y la acción del viento.

Luego de evaluar las respuestas dinámicas a fuerzas laterales puntuales de análisis que varían en espacio y/o tiempo sobre el puente Zanja la Zorra en los puntos de interés (1^{era} junta Gerber y junta del estribo Oeste), generadas por la circulación de un vehículo de gran porte sobre el puente, como un camión con semirremolque, se observa que los desplazamientos laterales transversales son de un orden de magnitud muy inferior respecto a los producidos por los efectos térmicos, 0.20 mm lateral frente a 10 mm promedio por junta en un año en sentido longitudinal. Los movimientos laterales del tablero inducidos por vehículos pesados son de baja intensidad (del orden de 0.20 mm), y son de tipo oscilatorio y de muchos ciclos.

El caso del efecto del viento analizado solo sobre el camión se evaluó para identificar si la naturaleza de la ráfaga, que varía en el tiempo sobre un vehículo en movimiento tenía algún efecto en la respuesta dinámica del puente.

Observando los registros de desplazamiento en las juntas por cambios térmicos en la totalidad de los puentes se concluyó que los desplazamientos longitudinales observados son los esperados. No se observaron fisuras apreciables a la vista en el hormigón de las vigas en la zona de apoyos de estribos.

Programar una campaña para medir la frecuencia del primer modo de vibración lateral de varios puentes donde hubo y donde no hubo desplazamiento de láminas de teflón y la relación de amortiguamiento crítico que presentan.

Se hace necesario inspeccionar en más detalle los topes laterales y medir la luz efectiva que hay en el tope ya que si las luces de la carrera real del tope son mayores a las de proyecto, efectivamente, los desplazamientos laterales serán mayores.

Bibliografía

- Inspección Anual y Evaluación del Puente Principal, Viaductos de Acceso y Puentes sobre las Islas. versiones 2003 a 2023. Crusa –SETEC.
- Vortex-induced vibrations on bridges: the interaction mechanism in complex sections and a new proposed semi-empirical model. Sánchez Corriols, Abraham.
- Vortex-induced vibrations on bridges. Chapter 5. Bridge case studies. Sánchez Corriols, Abraham. Universidad Politécnica de Madrid. 2015
- A review of cases of vortex shedding excitation in bridges: Sectional models testing. J. Á. Juradoa, & al. School of Civil Engineering. University of La Coruña, Spain, 2012.
- Análisis de un puente flexible ante los efectos de viento turbulento. Tesis. Ing. Héctor Hernández Landero. Universidad Nacional Autónoma De México.
- Dynamic Interaction Analysis of Long-Span Bridges Under Stochastic Traffic and Wind Loads. Ruien Wu & al. International College of Engineering, Changsha University of Science and Technology, China. 2025
- Experimental investigation on the vortex-induced vibration characteristics of long-span twin continuous steel box girder bridge. Bo Wang & al. Mechanical Engineering College, Xi'an Shiyou University, China. 2026
- Wind turbulence around a bridge deck in full scale. Nicolò Daniotti & al. Copenhagen, Denmark
- Review of the excitation mechanism and aerodynamic flow control of vortex-induced vibration of the main girder for long-span bridges: A vortex-dynamics approach. Donglai Gao & al. Harbin Institute of Technology, China. 2021