

PUENTE DE HORMIGÓN ARMADO CON DISIPADORES DE ENERGÍA CONSTRUIDO EN ZONA DE ALTO RIESGO SÍSMICO

Uliarte, Ricardo José Antonio

Ingeniero Civil , M. C. I. - San Juan, Argentina

Morandi, Javier Osvaldo

Ingeniero Civil (*), M. Cs. - San Juan, Argentina

Fiore, Juan Manuel

Ingeniero Civil (*) - San Juan, Argentina

Mengual, Víctor Hugo

Ingeniero Civil (*), M. Cs. - San Juan, Argentina

Victoria, Mabel del Valle

Arquitecta (**) - San Juan, Argentina

(*) Profesores e Investigadores del Instituto de Materiales y Suelos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de San Juan.

(**) Profesora de la Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Diseño de la Universidad Nacional de San Juan.

Resumen

En Argentina, se construyen puentes carreteros de Hormigón Armado cuya fundación o infraestructura se ejecuta “in situ”, mientras que la superestructura consta de vigas premoldeadas que soportan una losa de hormigón que une el conjunto.

Estas vigas están simplemente apoyadas sobre apoyos de goma, por lo cual, ante la ocurrencia de un terremoto, se pueden producir desplazamientos relativos entre la superestructura y la infraestructura del puente. Para limitar estos desplazamientos y soportar el impacto de la superestructura, se construyen topes sísmicos o bloques de hormigón fijados a la infraestructura.

El diseño de estos topes se hace normalmente bajo hipótesis aproximadas que en algunos casos pueden llevar a diseños inseguros en zonas de alta sismicidad.

El objeto de este trabajo es mostrar la mejora obtenida en la respuesta dinámica de la estructura de un puente que se ha construido en la provincia de San Juan mediante el uso de disipadores de energía.

Para estimar la respuesta sísmica se han realizado modelos matemáticos que consideran el comportamiento mecánico de los disipadores de energía ensayados en Laboratorio. Los resultados muestran que se reduce significativamente el impacto sobre los topes sísmicos, aumentándose así la seguridad estructural.

Abstract

Most reinforced concrete road bridges built in Argentina have their foundations or substructure constructed at the job site. On the other hand, the superstructure typically used consists of precast I- beams with an in situ slab that gives a monolithic connection.

These beams are placed on top of elastomeric bearings, so relative movements between the substructure and the superstructure of the bridge may occur at the event of an earthquake. In order to limit these seismic displacements, buffers are constructed. They are reinforced concrete blocks fixed to the substructure. Their design is usually done following approximate hypothesis which, in highly seismic areas, may be very insecure.

The aim of this job is to show the improvement made in the dynamic response of the structure of a bridge built in the province of San Juan, Argentina, due to the adding of energy-dissipating devices.

In order to predict the seismic response of the structure, mathematical models have been developed. The energy-dissipating devices have been tested in the Lab to analyze their mechanical behavior. Results show that the damage over seismic buffers is significantly reduced, and therefore structural security is raised.

Introducción

En la República Argentina se han construido numerosos puentes carreteros en zonas de alto riesgo sísmico, siguiendo la disposición y el esquema estructural que muestran las Figuras 1, 2, 3 y 4. En ellas se observa la superestructura, formada por: barandas de seguridad, carpeta de rodamiento, losa del tablero, vigas premoldeadas y viga de vinculación. La infraestructura se compone de los siguientes elementos: viga cabecera y pilas.

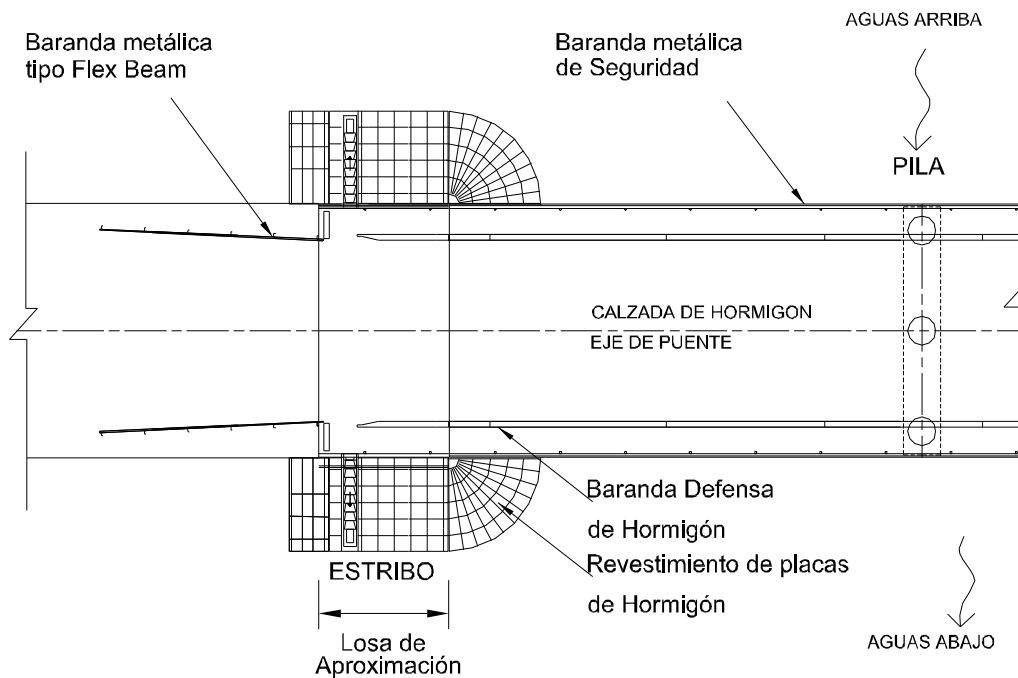


Figura 1: Planta de un tramo de Puente que incluye uno de los Estribos

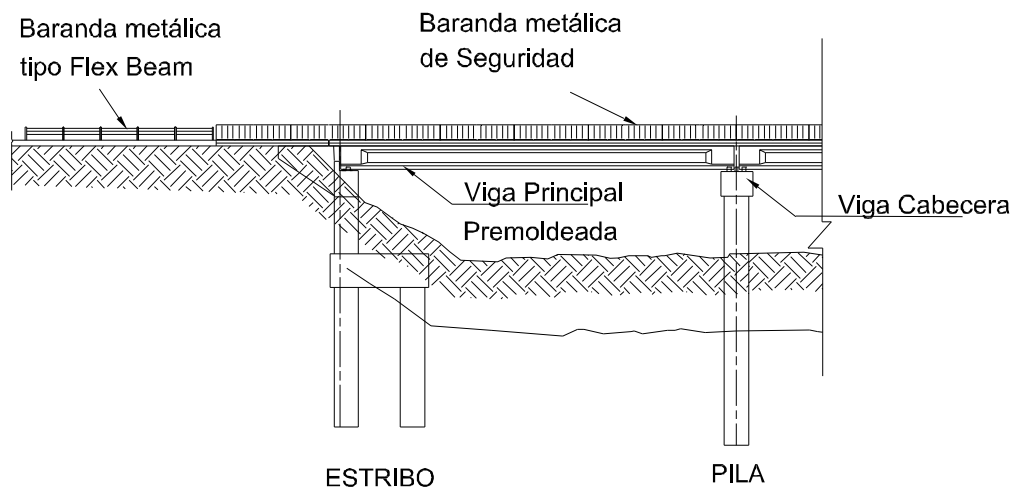


Figura 2: Vista Longitudinal

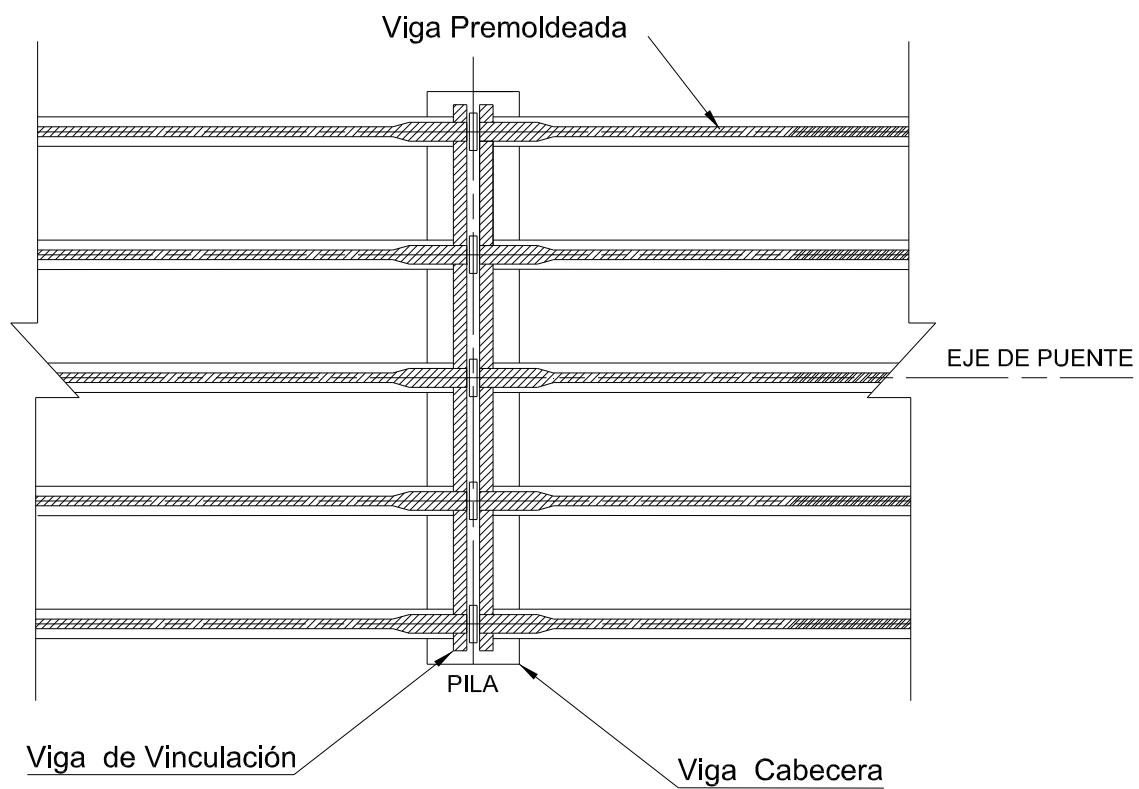


Figura 3: Planta que muestra las Vigas Premoldeadas apoyadas en la Viga Cabecera

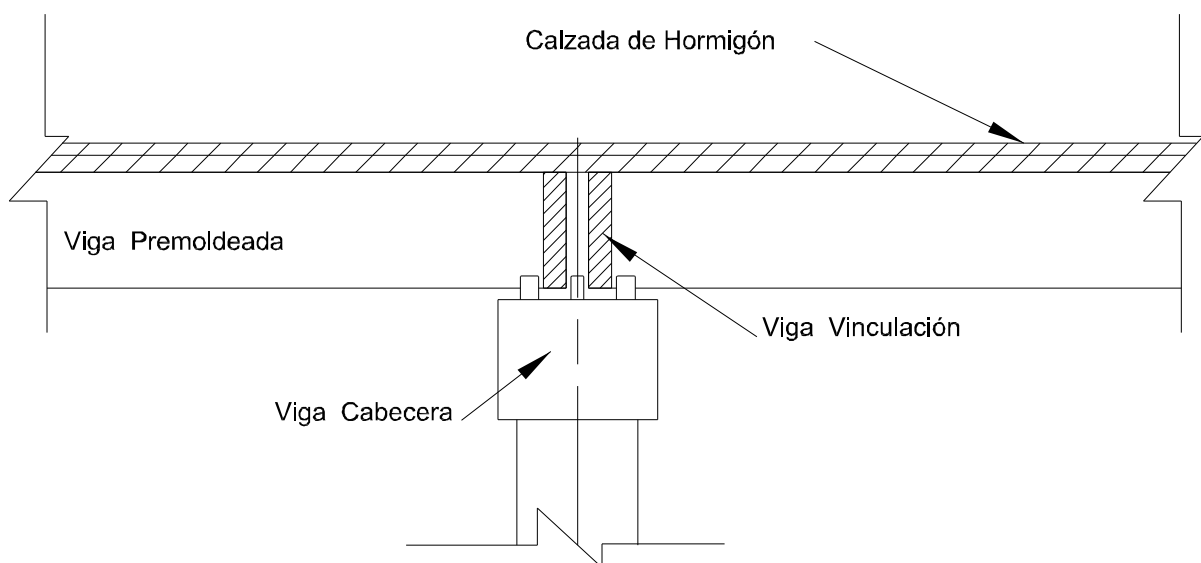


Figura 4: Corte Longitudinal que muestra la Viga de Vinculación

La viga cabecera (de la pila o del estribo) soporta los aparatos de apoyo, contruidos de goma y acero. Sobre éstos apoyan las vigas premoldeadas de hormigón pretensado, que luego se unen entre sí y con el tablero del puente mediante las vigas de vinculación que se hormigonan “in situ”. A ambos lados de las vigas premoldeadas se ubican los “bloques o topes sísmicos”, cuya finalidad es evitar que se produzcan desplazamientos excesivos ante un eventual movimiento sísmico, que desacomoden el arreglo original de los elementos del puente y, para casos severos, reducir la posibilidad de caída del tablero. Figuras 5 y 6.

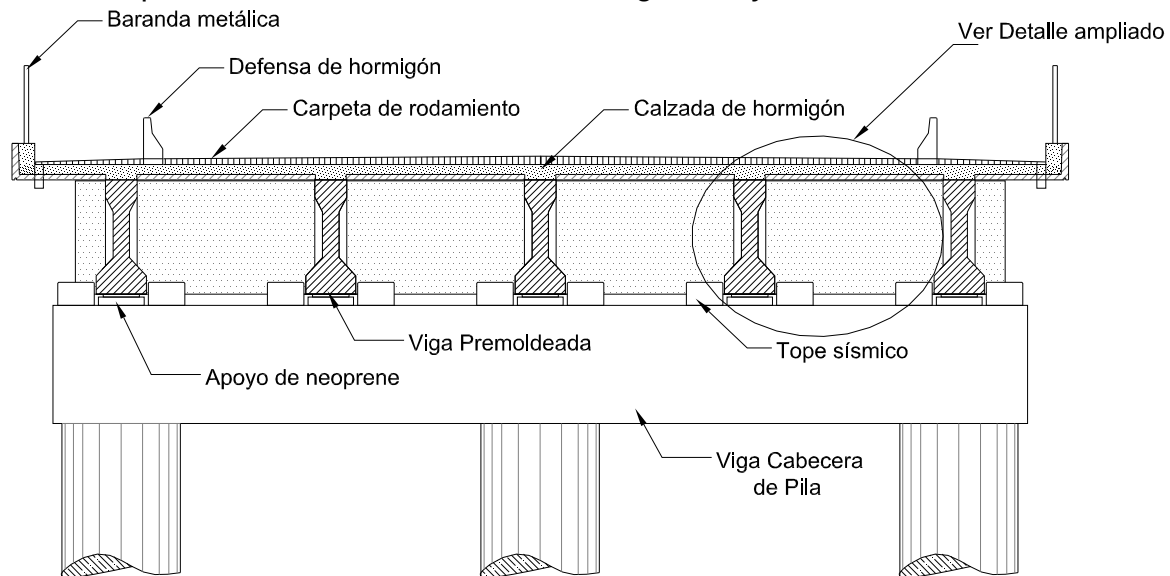


Figura 5: Corte Transversal del Puente

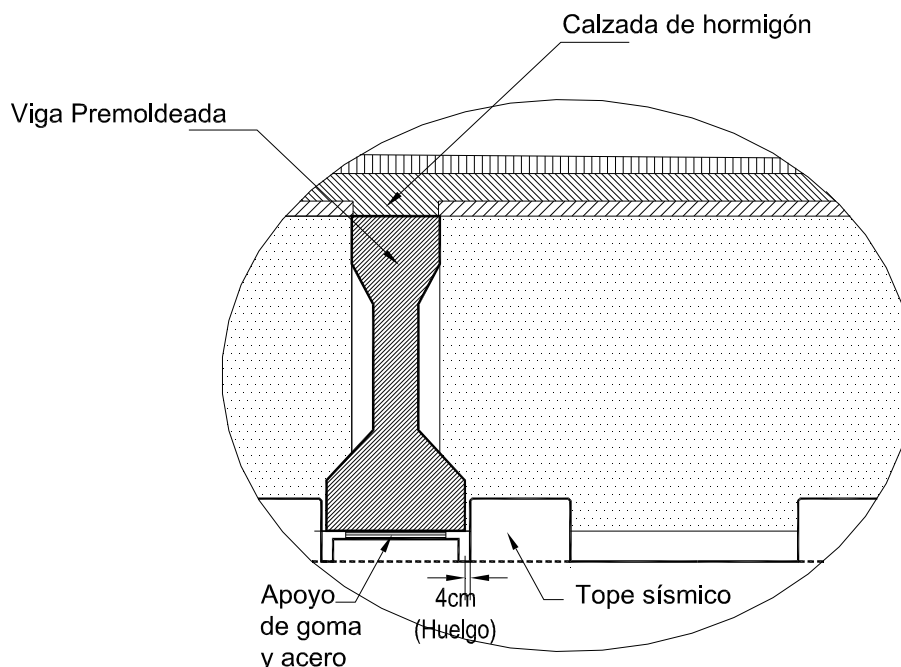


Figura 6: Detalle de la zona de apoyo de la Viga Premoldeada. Es habitual que la separación entre el borde de la Viga y el Tope sísmico sea del orden de los 4cm.

Objetivo del trabajo

Este trabajo tiene como objetivo demostrar que el diseño actual de los topes sísmicos para puentes es, a nuestro criterio, incorrecto y que es posible aumentar la seguridad de la estructura incorporando dispositivos de disipación de energía que reduzcan las posibilidades de impacto y minimicen las fuerzas de choque entre los elementos estructurales del puente.

Diseño convencional de los topes sísmicos

Generalmente los topes sísmicos se diseñan en forma estática, para un esfuerzo que resulta de multiplicar un coeficiente sísmico por la reacción de la viga premoldeada. Este coeficiente es el que resulta del espectro de respuesta sísmica correspondiente, reducido por un factor que considera la ductilidad de la estructura.

Ejemplo de Diseño de Topes Sísmicos

El puente construido tiene 12 tramos de 25 metros de longitud cada uno. Se han utilizado cinco vigas premoldeadas por tramo. Si se calcula la reacción (R_v) de cada viga premoldeada sobre el aparato de apoyo, para un puente de categoría A30, según la denominación de la Dirección Nacional de Vialidad, se obtendrá el siguiente esfuerzo.

La fuerza de diseño " F_d ", usualmente usada para el diseño de cada tope sísmico, se calcula como:

$$F_d = C_s \times R_v = 0,35 \times 54.000 \text{ kg} = 18.900 \text{ kg} ; \text{ donde}$$

$$C_s = S_a/R = 1,05/3 = 0,35. \text{ (Reglamento INPRES CIRSOC 103)}$$

S_a = pseudoaceleración sísmica.

R = coeficiente de reducción.

Para el caso de disponer un tope por viga cuya sección transversal es de 20 cm x 40 cm, la tensión de corte será:

$$\tau \text{ (kg/cm}^2\text{)} = 18.900 \text{ kg} / (20 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}) = 23,62 \text{ kg/cm}^2.$$

Fuerzas que pueden producirse al impactar el talón de viga principal con el tope sísmico ante la ocurrencia de un movimiento sísmico severo.

El puente ubicado en la localidad de Sorocayense, provincia de San Juan, se modeló utilizando el programa para computadora SAP 2000, versión 7.4. El suelo de fundación está formado por gravas con un grado de compactación de medio a denso (GP y GW). Se utilizaron elementos tipo resorte para modelar el contacto entre las pilas y el suelo. Al nivel del tablero se asignaron las masas que corresponden medio tramo del puente, considerando solamente los pesos muertos. Se utilizaron los siguientes registros sísmicos en el análisis:

- Argentina: Caucete, 23 de noviembre de 1977
- Chile: 3 de marzo de 1985, Lolleo N10E, Melipilla N20E y Viña N70W,
- USA: El Centro (Imperial Valley 1940), Corralitos N-S (Loma Prieta 1989), Arleta E-W y Sylmar N-S (Northridge 1994)
- México SCT (1985)
- Japón: Port Island (instrumento 1) (Kobe 1995)

Con elementos tipo gap se modeló el contacto entre el talón de la viga premoldeada y la posición del tope sísmico dándosele una apertura al elemento GAP de 4 cm.

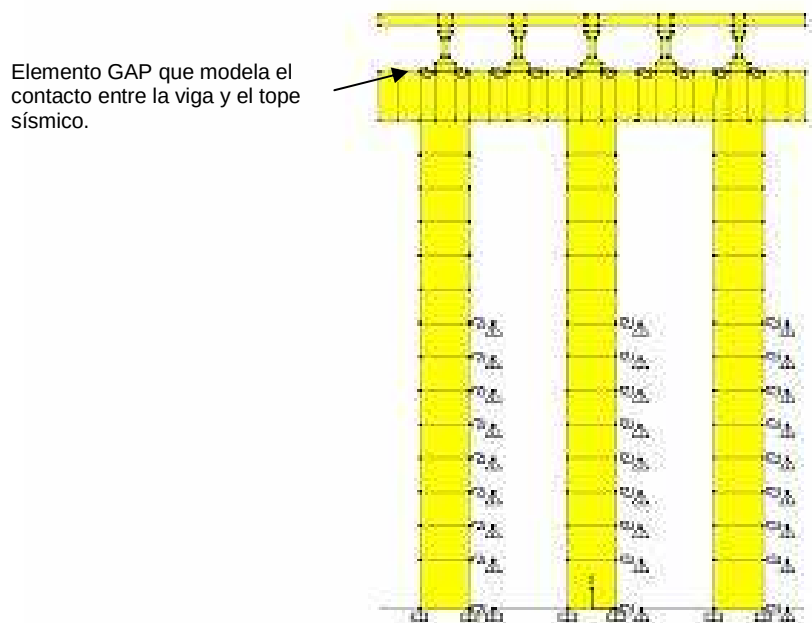


Figura 7. Modelo por Elementos Finitos de parte del Puente - Se observan: la Pila, la Viga Cabecera, las Vigas Premoldeadas y el Tablero.

Del análisis antes mencionado surgieron los resultados que se presentan en la Tabla 1. En ella se observa que las fuerzas de impacto son ampliamente superiores a las de un análisis estático simplificado, como el que se describió en el punto “Diseño Convencional de Topes sísmicos”, las que seguramente pueden causar un importante daño a la estructura. La Figura 8 muestra la viga al momento de hacer contacto con el tope.

TABLA 1:

PLANILLA RESUMEN DE LOS ESFUERZOS SOBRE EL TOPE SÍSMICO

REGISTRO	LUGAR DEL REGISTRO	ACELERACIÓN MÁXIMA (% g)	FUERZA DE IMPACTO (kg)	TENSIONES EN EL TOPE (kg/cm ²)	OBSERVACIONES
Caucete	San Juan - RA	0,173 g	147200	92,0	Se estima un importante daño sobre la estructura al superar los valores de rotura por corte.
Melipilla	Chile	0,686 g	441600	276,0	
Viña	Chile	0,237 g	257600	161,0	
El Centro	E.E. U.U.	0,358 g	368000	230,0	
Sylmar	E.E. U.U.	0,843 g	529920	331,2	
Arleta	E.E. U.U.	0,344 g	441600	276,0	
Corralito	E.E. U.U.	0,629	294400	184,0	
México	México	0,171 g	515200	322,0	
Kobe	Japón	0,310 g	441600	276,0	

g= aceleración de la gravedad

TOPE = Tope antisísmico

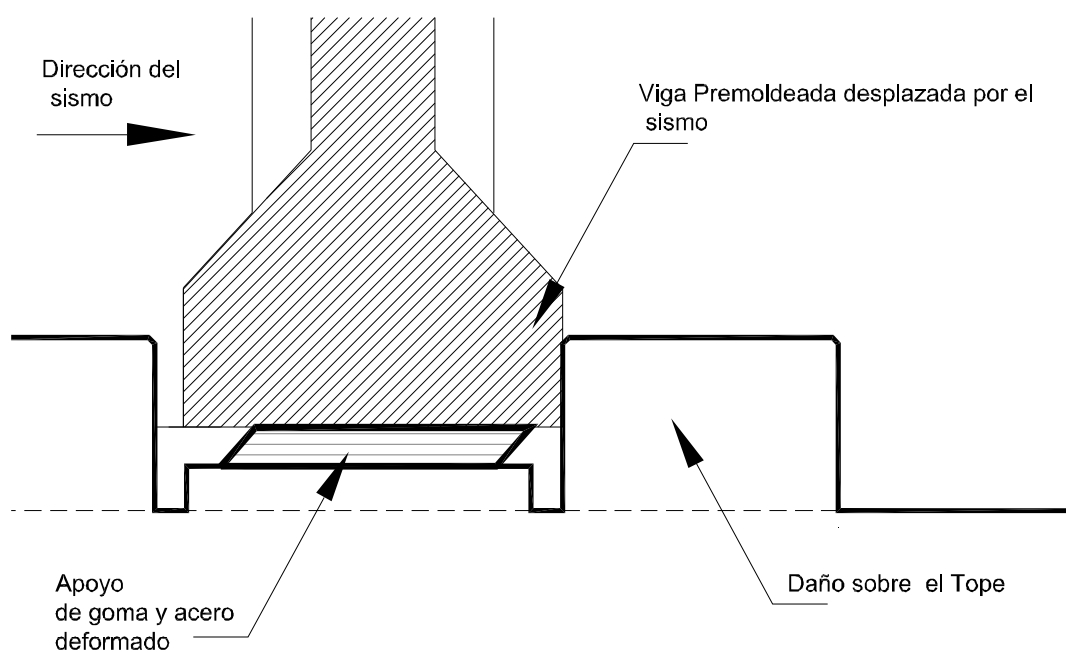


Figura 8: Desplazamiento de la Viga Premoldeada durante el movimiento sísmico que puede provocar daños en la estructura.

Disipadores de Energía – Breve reseña.

Todas las estructuras vibrantes disipan energía debido a fricciones internas, deformaciones plásticas o combinaciones de ambas. Es un hecho que mientras mayor es la disipación de energía menor es la amplitud de las vibraciones. Algunas estructuras tienen un amortiguamiento muy bajo, del orden del 1 % del crítico, y en consecuencia experimentan grandes amplitudes de vibración tanto para terremotos severos como moderados; por ello las técnicas que aumentan la energía de disipación son muy efectivas para reducir las amplitudes de vibración. Al presente se han propuesto y usado muchos sistemas para incrementar el amortiguamiento de las estructuras, con diferentes materiales y dispositivos. Los sistemas se pueden usar tanto en estructuras nuevas como en aquellas que necesitan ser rehabilitadas.

En los últimos años se han llevado a cabo importantes esfuerzos para el desarrollo del concepto de disipación pasiva y muchas estructuras en el mundo cuentan con estos dispositivos. En general se caracterizan por aumentar la capacidad de disipación de las estructuras donde están instaladas.

Los disipadores funcionan ya sea porque convierten la energía cinética en calor o por la transferencia de energía entre diferentes modos de vibración. El primer método incluye dispositivos que operan sobre el principio de fricción por deslizamiento, fluencia de metales, transformación de fase en metales, deformación de elementos viscoelásticos sólidos y obligan a fluir a líquidos viscosos a través de orificios. El segundo método se basa en incluir osciladores suplementarios que actúan como absorbedores dinámicos de la vibración.

A continuación se mencionan algunos de los más conocidos, junto con sus principales características.

a) Amortiguadores Metálicos: Uno de los mecanismos efectivos para la disipación de energía es a través de la deformación inelástica de los metales. La idea de utilizar disipadores metálicos en una estructura para absorber gran parte de la energía que los terremotos introducen en éstas empezó con el trabajo conceptual y experimental de Robert Kelly y Skinner.

b) Amortiguadores Friccionales: La fricción es un excelente mecanismo para la disipación de energía que se ha utilizado en la industria automotriz en los frenos de los automóviles, transformando la energía cinética en calor.

En Ingeniería Estructural se ha propuesto y desarrollado una amplia variedad de dispositivos que difieren en la complejidad mecánica y en los materiales en que deslizan. En ellos es importante minimizar el fenómeno frenado-deslizamiento (stick - slip) para evitar que se introduzca excitación de alta frecuencia. Debe procurarse que el material de deslizamiento seleccionado no altere significativamente el coeficiente de fricción con el tiempo. La idea de diseño de estos amortiguadores es que no deslicen para terremotos moderados o cargas inducidas por el viento.

Normalmente estos aparatos tienen un adecuado desempeño y no son afectados por la amplitud de las cargas, la frecuencia, o el número de ciclos.

Para el diseño de estructuras con estos dispositivos se requiere un análisis no lineal en el dominio del tiempo.

c) Amortiguadores Viscoelásticos: Los amortiguadores metálicos y friccionales tienen aplicación principalmente para reducir los efectos que ocasionan

los terremotos en las estructuras, en cambio los amortiguadores fabricados a partir de materiales viscoelásticos pueden utilizarse tanto para reducir vibraciones provocadas por el viento y/o por los terremotos.

El comportamiento de los materiales viscoelásticos bajo cargas dinámicas depende de la frecuencia de la excitación, de la deformación y de la temperatura ambiente. Recientes experimentos y estudios analíticos han demostrado la efectividad de los amortiguadores viscoelásticos que se usan tanto en estructuras de Acero como de Hormigón Armado para una amplia gama de terremotos.

d) Amortiguadores de Fluido Viscoso: Los fluidos pueden utilizarse para disipar energía y por ello se han aplicado en numerosos diseños. Un tipo de estos amortiguadores consta de un pistón cilíndrico sumergido en un fluido viscoelástico. Los amortiguadores de fluidos viscosos se han empleado en construcciones militares y aeroespaciales. Su característica es que tienen respuesta lineal viscosa para un amplio rango de frecuencias.

e) Amortiguadores de Masa Sintonizada (TMD): El concepto de amortiguador de masa sintonizada (Tuned Mass Dampers -TMD) data de la década de 1940. Consiste en una masa secundaria con un elemento que la vincula a la estructura primaria y le da cierta rigidez. Los ciclos de histéresis que se producen aumentan el amortiguamiento en la estructura primaria.

Disipador Propuesto para el puente

En el Proyecto del puente de Sorocayense se decidió utilizar un Amortiguador Metálico. El motivo de esta selección es su economía, ya que no se requieren materiales ni técnicas especiales para su fabricación, y se puede construir en cualquier taller equipado con un torno mecánico. El material utilizado en este caso es acero calidad SAE 1010. Las Figuras 9, 10 y 11 muestran la ubicación dada al disipador con el objeto de captar el desplazamiento relativo entre la superestructura y la infraestructura. Las Fotos N° 1, 2 y 3, muestran el disipador utilizado en el puente de Sorocayense.

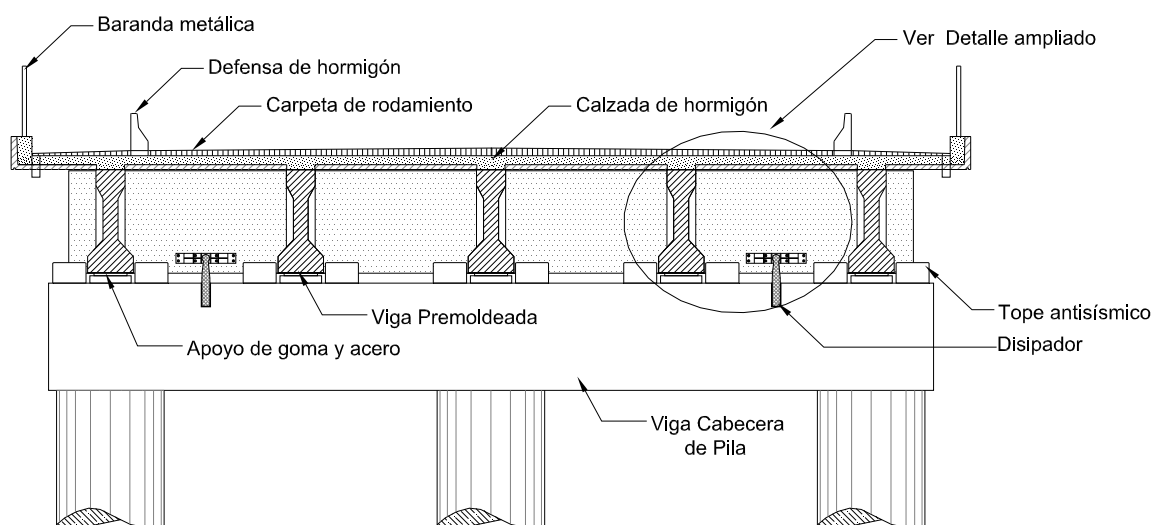


Figura 9: Corte Transversal del Puente que muestra la ubicación del disipador.

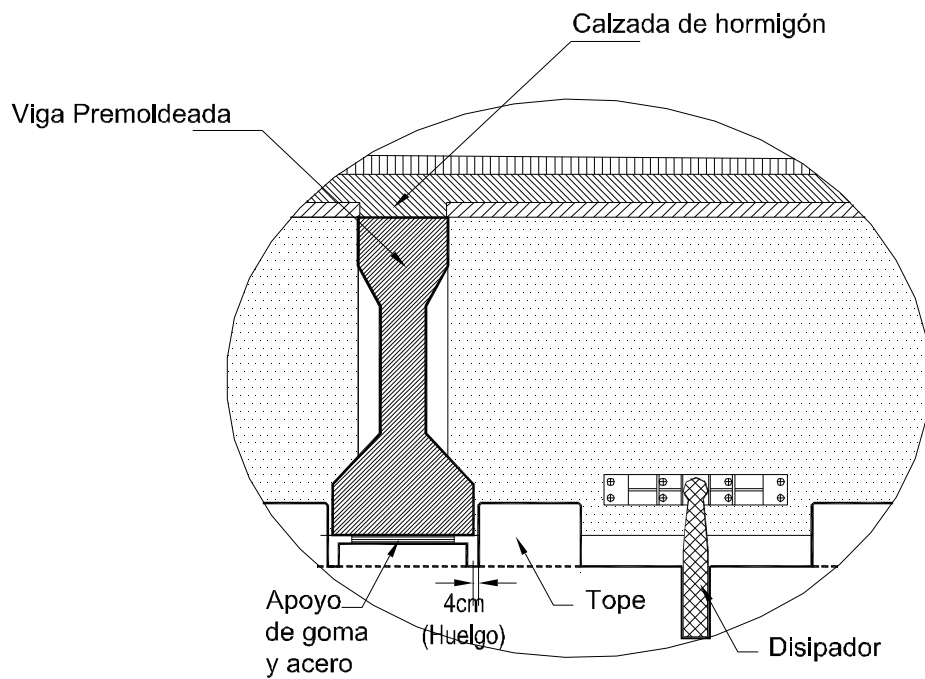


Figura 10: Detalle de la zona de apoyo de la Viga Premoldeada. Es habitual que la separación entre el borde de la Viga y el Tope sísmico sea del orden de los 4cm.

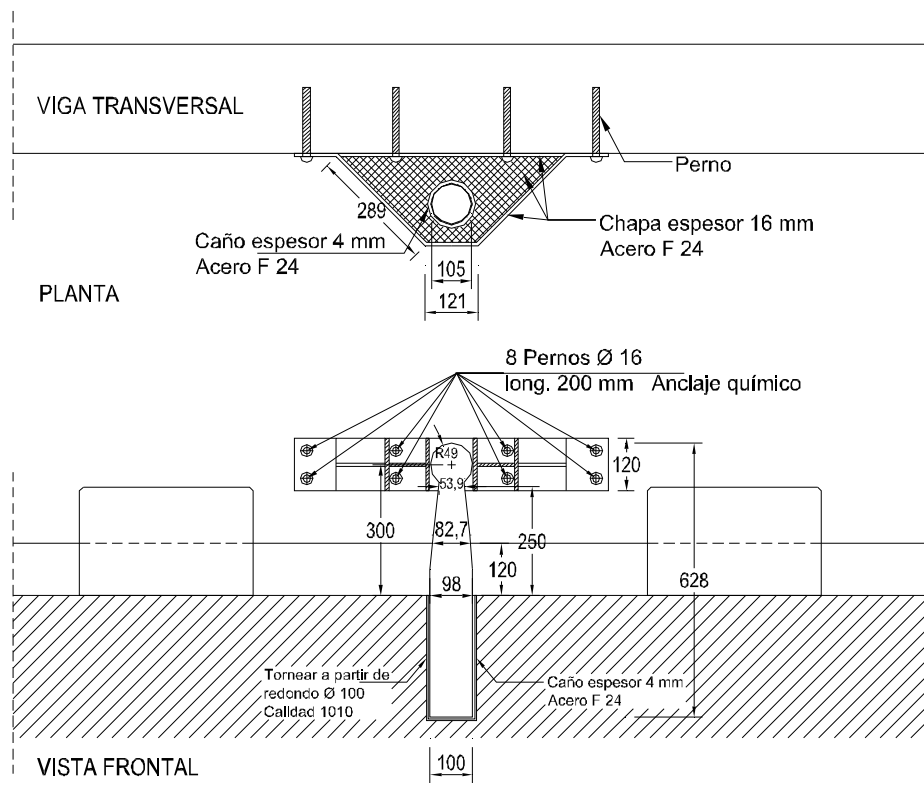


Figura 11: Esquema del disipador propuesto.



Fotografía N° 1- Vista a lo lejos de la ubicación del disipador. Puente en Sorocayense, provincia de San Juan.



Fotografía N° 2 – Disipador utilizado en el puente en Sorocayense.

Ensayos para obtener propiedades

Se realizó un diseño geométrico del dissipador y luego se lo ensayó para obtener su ley constitutiva. Los resultados de estos ensayos se usaron en la modelación matemática que se realizó para obtener el comportamiento de puente con la incorporación de estos dissipadores. La Fotografías N° 3 y N° 4, muestran un prototipo de dissipador luego de ser ensayado.



Fotografía N° 3 – Dissipador de energía a utilizarse en el Puente de Sorocayense de la Provincia de San Juan. Se observan dos dissipadores unidos por la base, a los efectos de realizar uno de los ensayos.



Fotografía N° 4 – Ensayo de los dissipadores de Energía. Se observan divisiones igualmente espaciadas antes y después de la deformación.

Resultado de incorporar los disipadores al puente

TABLA 2: RESUMEN DE LOS DESPLAZAMIENTOS RELATIVOS ENTRE LA SUPERESTRUCTURA E INFRAESTRUCTURA AI INCORPORAR LOS DISIPADORES.

REGISTRO	LUGAR DEL REGISTRO	DESPLAZAMIENTO RELATIVO MÁXIMO (cm)	OBSERVACIONES
Caucete	San Juan - RA	2.4	No hay impacto sobre el tope, ya que el desplazamiento es menor que el huelgo de 4 cm.
Melipilla	Chile	3.9	
Viña	Chile	3.0	
El Centro	E.E. U.U.	3.6	
Sylmar	E.E. U.U.	4.0	Si hay impacto
Arleta	E.E. U.U.	3.7	No hay impacto sobre el tope, ya que el desplazamiento es menor que el huelgo de 4 cm.
Corralito	E.E. U.U.	3.0	
México	México	3.9	
Kobe	Japón	3.6	

Comentarios Finales

La Tabla 1 y la Tabla 2, resumen los resultados de este trabajo. Para el caso de incorporar disipadores de energía, se observa que solamente para el registro de Sylmar se produce impacto sobre el tope, pero con una fuerza menor. Si el puente verdaderamente estuviera expuesto a un registro como el de Sylmar, la alternativa es colocar un disipador más robusto.

En el puente de Sorocayense se han finalizado los trabajos de construcción. La obra se ejecutó en un plazo de 18 meses.

El costo de incorporar los disipadores es menor al 0,8 % del valor de la obra. Se considera que este monto es poco significativo frente al buen comportamiento que se muestra en los análisis de computadora realizados y a los Ensayos de laboratorio de los mismos.

El diseño realizado permite el reemplazo de los disipadores cuando se hayan dañado seriamente ya que actúan como elementos fusible.

Conclusiones

- El diseño estático convencional es insuficiente para estimar las fuerzas de choque que intervienen entre la viga y el tope sísmico.
- La incorporación de Disipadores de energía aumenta sustancialmente la seguridad del puente analizado a un costo muy razonable.
- Se controla el desplazamiento y la fuerza de impacto en uno de los elementos más críticos como es la parte inferior del apoyo de la viga premoldeada.

Referencias Bibliográficas

-Bozorgnia, Yousef - Bertero, Vitelmo V. *"Earthquake Engineering: from engineering seismology to performance – based engineering"* . CRC Press, 2004

-Chen, Wai-Fah – Duan, Lian *"Bridge Engineering: Seismic design"* CRC Press, 2003

-Chen, Wai-Fah – Duan, Lian *"Bridge Engineering: Substructure design"* CRC Press, 2003

-Priestly, M. J. N. – Seible, F. – Calvi, G. M. *"Seismic Design and Retrofit of bridges"* Wiley Interscience Publication, 1996

-Uliarte, Ricardo. *"Sistemas Pasivos de Disipación de Energía para la Reducción de Vibraciones en Estructuras: Análisis y Diseño"* , Pontificia Universidad Católica de Chile – Tesis para grado de Magister en Ciencias de la Ingeniería.