

# Congreso Estructuras 2015

XIII Seminario de Ingeniería Estructural y Sísmica

5 al 7 de agosto 2015, Hotel Barceló San José Palacio, Costa Rica

## CONGRESO ESTRUCTURAS 2015 XIII SEMINARIO DE INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA SAN JOSÉ, COSTA RICA 5 AL 7, AGOSTO 2015

### ESTUDIO EXPERIMENTAL DE VIGAS DIAFRAGMA PREFABRICADAS DÚCTILES EN LOS EXTREMOS DE PUENTES VIGA-LOSA DE CONCRETO: ANÁLISIS PRELIMINAR

**Ing. Esteban Villalobos Vega**

*Costa Rica, esteban.villalobos@ucr.ac.cr, LanammeUCR, Unidad de Puentes*

**Ing. Guillermo Santana Barboza, Ph.D.**

*Costa Rica, guillermo.santana@ucr.ac.cr, INCOFER, Presidente Ejecutivo*

**Ing. Luis Carlos Meseguer Quesada, MBA**

*Costa Rica, luis.meseguer@holcim.com, Holcim Costa Rica, CETEC, Coordinador*

#### RESUMEN

Si bien es cierto no han sido extensivamente reportadas a nivel mundial fallas de vigas diafragma en puentes de concreto en terremotos pasados, el terremoto de Chile del 2010 demostró la importancia de su uso en los extremos de puentes, y planteó además la necesidad de entender y desarrollar un patrón de transferencia de carga claro y viable durante los eventos sísmicos. Sin embargo, tanto los trabajos experimentales como las provisiones de diseño sísmico de diafragmas en puentes de concreto son escasas y generales. El presente trabajo propone el uso de vigas diafragma prefabricadas dúctiles en los extremos de puentes de concreto utilizando para ello el sistema híbrido en las conexiones, esto es, postensión desadherida en combinación con acero de refuerzo convencional, los cuales actúan como fusibles en la dirección trasversal de la estructura al ser diseñados con una resistencia de fluencia menor que la resistencia nominal de la subestructura. El proyecto incluye la propuesta de un método de análisis sísmico simplificado de puentes viga-losa de concreto con vigas diafragma dúctiles de concreto prefabricado en los extremos, para diseñar y predecir el comportamiento del sistema estructural. La fase final será el ensayo a carga lateral cíclica en el laboratorio de un extremo de 0,6m de longitud a escala real de un puente prototipo. Este sistema podría ser implementado en puentes nuevos como parte de una solución de Construcción Acelerada de Puentes (ABC por sus siglas en inglés), o en el caso de que sea necesario desarrollar soluciones factibles que tengan el objetivo de readecuar sísmicamente puentes de concreto antiguos o que se han dañado.

### INTRODUCCIÓN

Un paradigma que ha ganado fuerza en años recientes es la preocupación de la sociedad civil con respecto al cierre de vías como resultado de la sustitución o rehabilitación de puentes. Las consecuencias de estos trabajos pueden ir desde pérdidas económicas para los usuarios, riesgos a la seguridad relacionados con las zonas de trabajo, impacto ambiental, y en general problemas que empeoran la percepción del público con respecto a las agencias de transporte. En este contexto, el uso de soluciones de Construcción Acelerada de Puentes (Conocidas como ABC por sus siglas en inglés), presentan una oportunidad única de superar estos retos de manera eficiente y durable.

Incluso si la falla de vigas diafragma en puentes de concreto no ha sido extensivamente reportada en eventos pasados, el terremoto de Chile del 2010 vino a demostrar la importancia de su uso en los extremos de puentes, y planteó además la necesidad de entender y desarrollar un patrón de transferencia de carga claro y viable durante los eventos sísmicos (Yen et al., 2011). Sin embargo, de acuerdo con el conocimiento y la investigación bibliográfica hecha por el autor, tanto los trabajos experimentales como las especificaciones de diseño sísmico para vigas diafragma de concreto son escasas y generales.

Por lo tanto, sería importante no sólo desarrollar una propuesta en el diseño y detallado de vigas diafragma para resistencia sísmica en los extremos de puentes de concreto, sino además explorar el uso de diafragmas dúctiles que actúen como fusibles en la resistencia sísmica transversal como parte de soluciones ABC para la rehabilitación de infraestructura con varias décadas en funcionamiento, diseño de estructuras nuevas o incluso una combinación de ambos, en el caso de puentes de concreto simplemente apoyados de una o varias luces menores a 35m.

### VIGA DIAFRAGMA CONVENCIONAL

En la Fig. 1 se muestra el detalle estándar monolítico que es utilizado en las vigas diafragma convencionales de concreto colado en sitio. El razonamiento detrás de este detallado es asegurarse la transferencia de carga sísmica desde la superestructura a la subestructura sin ningún tipo de daño en el sistema losa-viga-diafragma, lo cual podría ser una de las razones por cuales es difícil encontrar reportes de daños en vigas diafragma de concreto en terremotos pasados. Si bien es cierto este tipo de esquema es completamente válido, otra consecuencia de su uso es que generalmente el umbral de fuerza de daño inaceptable para la subestructura incluyendo los apoyos, las pilas, y/o los bastiones, es menor que la resistencia del sistema losa-viga-diafragma de la superestructura, y precisamente en estos elementos de la subestructura sí han sido observado distintos daños de importancia en terremotos de relevancia a nivel mundial (Caltrans, 2006).



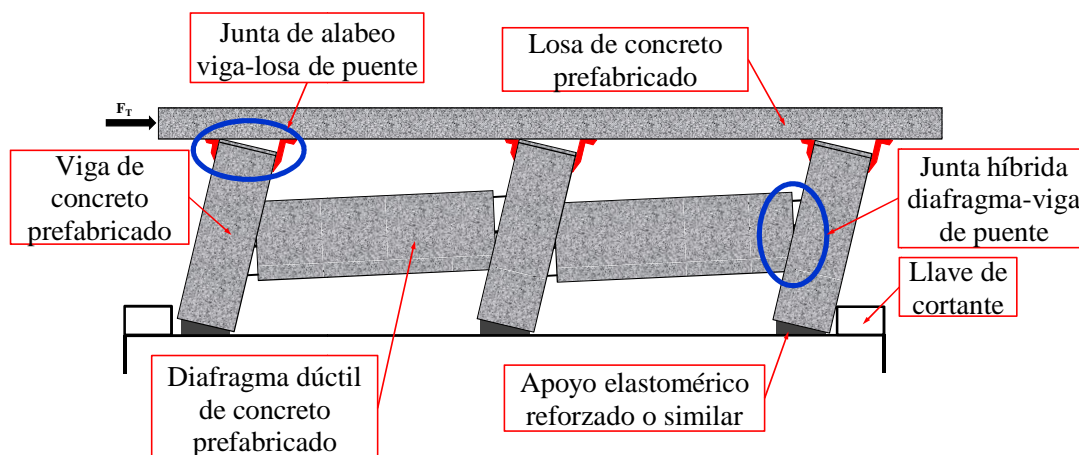
**Figura 1.-** Práctica estándar de vigas diafragma de concreto colado en sitio.

### DESCRIPCION DEL SISTEMA DÚCTIL PROPUESTO

Similar al trabajo realizado por Zahrai y Bruneau (1999) en puentes de acero, es posible utilizar una solución para la resistencia sísmica de edificios de concreto prefabricado que haya probado ser exitosa con el objetivo de proponer vigas diafragma prefabricadas dúctiles en los extremos de puentes, que actúen como fusibles en la dirección transversal de la estructura al ser diseñadas con una resistencia de fluencia menor que la resistencia nominal de la subestructura, protegiendo por lo tanto a esta última de daño. Para lograr esto se propone utilizar mecanismos de alabeo en las siguientes conexiones (Ver Fig. 2):

(A) Junta viga diafragma-viga de puente: Se utiliza el sistema de conexiones híbridas de postensión desadherida con acero de refuerzo convencional.

(B) Junta viga de puente-losa de puente: Se utiliza una conexión de momento parcialmente restringida (PR por sus siglas en inglés) con el objetivo de permitir a la junta rotar con la menor capacidad de resistencia a momento posible y en donde el daño se dará en la forma de la fluencia de angulares de acero. Por lo tanto la losa de puente debe ser prefabricada para poder lograr un mecanismo de alabeo controlado. Lo anterior implica que la solución completa es 100% prefabricada.



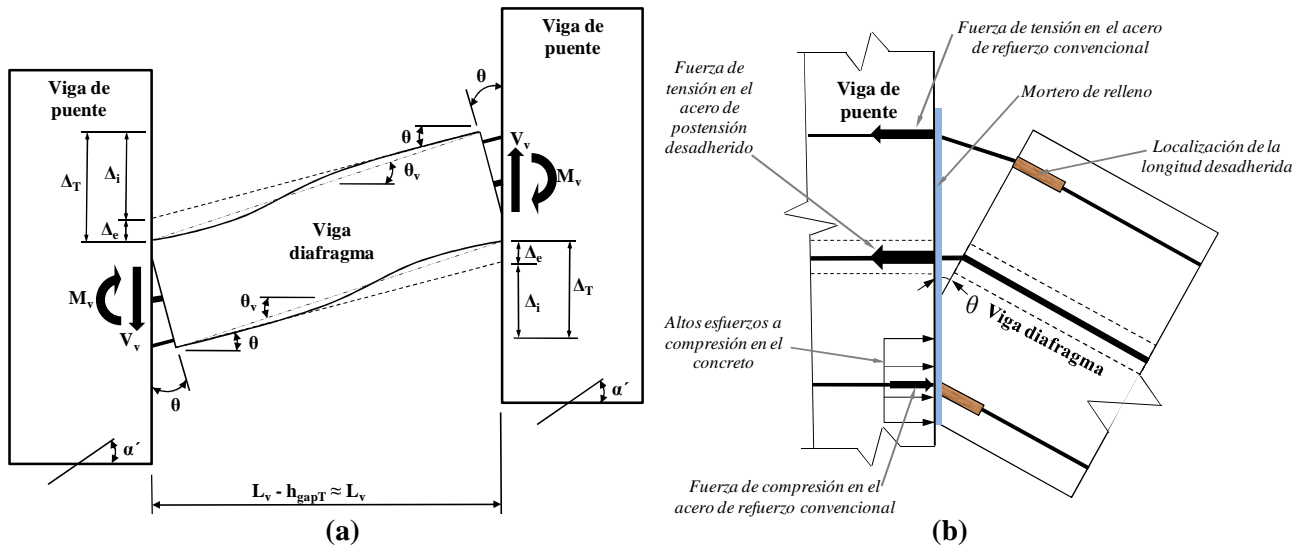
**Figura 2.-** Propuesta de sistema de diafragmas dúctiles en los extremo de puentes viga-losa de concreto.

### JUNTA HÍBRIDA VIGA DIAFRAGMA-VIGA DE PUENTE

Como se puede observar en la Fig. 3, el sistema híbrido basa su comportamiento casi exclusivamente en la abertura de la junta entre los elementos de la conexión: vigas diafragma y vigas principales del puente. Con el objetivo de alcanzar este propósito, el sistema está compuesto por: (a) Acero de postensión ubicado en el centroide de la sección transversal del diafragma y desadherido en toda su longitud, el cual provee capacidad de re-centrado a la conexión; (b) La misma cantidad de acero de refuerzo convencional superior e inferior con una longitud desadherida intencional en la conexión para evitar la falla prematura por fatiga de bajo ciclaje de las varillas y que provee la capacidad de disipación de energía al sistema. Adicionalmente se utiliza un espesor de mortero de relleno en la interfase entre los elementos para tomar en cuenta las tolerancias constructiva, y además es necesario confinar el concreto de los extremos debido al desarrollo de altos esfuerzo de compresión en la interfase.

Con el objetivo de describir el comportamiento de la junta híbrida, considérese la Fig. 3(a), en donde la rotación o deriva total de las vigas de puente,  $\alpha'$ , es mostrada como un desplazamiento

relativo entre diafragmas,  $\Delta_T$ , el cual podría ser o bien el desplazamiento de fluencia o el desplazamiento último. Este desplazamiento total está compuesto por una componente inelástica,  $\Delta_i$ , y una componente elástica,  $\Delta_e$ . La componente inelástica es 100% responsable de la rotación de la junta, y la suma de ambas rotaciones, componentes elástica,  $\theta_e$ , e inelástica,  $\theta$ , conforman la rotación de la viga diafragma,  $\theta_v$ . Lo anterior supone que el elemento prefabricado de la viga diafragma no sufre agrietamiento considerable durante un evento sísmico incluso hasta la falla de la junta, lo cual deberá ser comprobado en el ensayo a realizar.



**Figura 3.-** Esquema idealizado de la deformada y fuerzas del sistema híbrido: (a) Esquema de la viga diafragma dúctil de los extremos; (b) Esquema de la junta híbrida.

Basándose en las ecuaciones desarrolladas por Restrepo y Rahman (2007) para muros estructurales híbridos, el estado de fluencia se puede caracterizar por medio de la rigidez inicial elástica,  $K_{iv}$ , por medio de la siguiente ecuación:

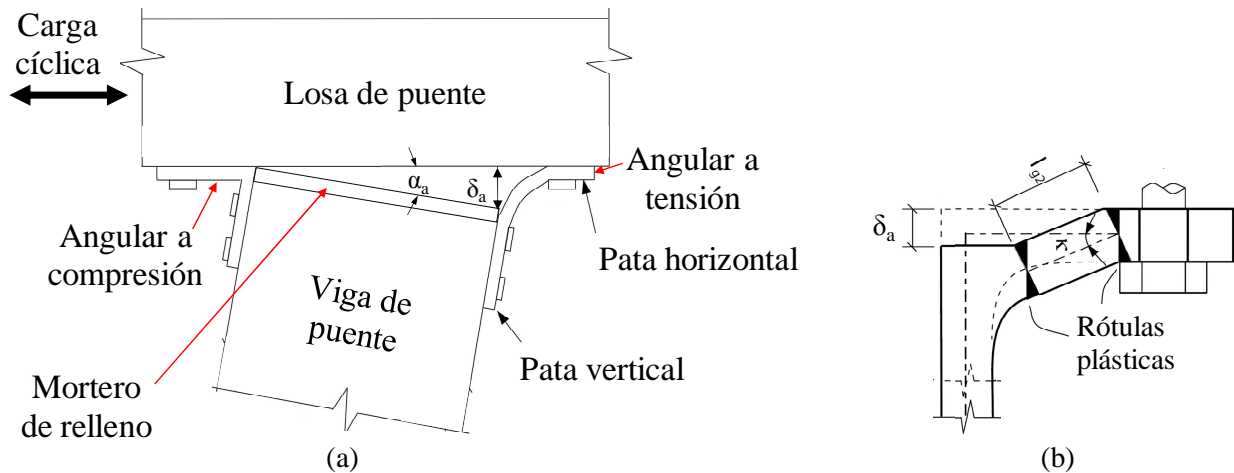
$$K_{iv} = \frac{[T_{pe} \cdot (h_v - \beta_1 \cdot \xi \cdot d_{st}) + T_{sty} \cdot d_{st} \cdot (2 - \beta_1 \cdot \xi)]}{\frac{[T_{pe} \cdot (h_v - \beta_1 \cdot \xi \cdot d_{st}) + T_{sty} \cdot d_{st} \cdot (2 - \beta_1 \cdot \xi)] \cdot L_v^3}{12 \cdot E_c \cdot I_g} + \left(1 + \frac{36 \cdot I_g}{A_g \cdot L_v^2}\right) + \frac{\epsilon_{sh} \cdot L_u}{(1 - \xi) \cdot d_{st}} \cdot L_v^2} \quad [1]$$

donde  $E_c$  es el módulo de elasticidad de la viga diafragma;  $L_v$  es la longitud de la viga diafragma;  $I_g$  es el momento de inercia de la sección transversal gruesa de la viga diafragma;  $A_g$  es el área de la sección transversal gruesa de la viga diafragma;  $L_u$  es la longitud desadherida intencional del acero de refuerzo convencional;  $\epsilon_{sh}$  es la deformación en el acero de refuerzo convencional al inicio del endurecimiento por deformación;  $d_{st}$  es el peralte efectivo del acero de refuerzo convencional a tensión;  $\xi$  es un parámetro para aproximar el valor del eje neutro;  $h_v$  es la altura total de la viga diafragma;  $T_{pe}$  es la fuerza total efectiva en el acero de postensión luego de las pérdidas;  $T_{sty}$  es la fuerza total a fluencia del acero de refuerzo convencional a tensión;  $\beta_1$  es el parámetro del bloque equivalente de esfuerzos rectangulares en el concreto.

### JUNTA DE ALABEO VIGA DE PUENTE-LOSA DE PUENTE

Basándose en el comportamiento de conexiones de momento parcialmente restringidas (PR) para estructuras de acero, en la Fig. 4 se muestra el concepto del comportamiento de la junta. La viga principal de puente y la losa prefabricada se unen únicamente por medio de angulares de acero cuyas conexiones deben ser de deslizamiento crítico por medio de pernos de alta resistencia.

Conforme la losa se mueve horizontalmente debido a la acción sísmica, en la conexión se separa la interfase mortero de relleno-losa prefabricada. Una vez la junta se abre, los angulares a tensión son sometidos a doble curvatura de momento en la pata horizontal. Hay un punto en el que las secciones de la doble curvatura plastifican y comienzan a disipar energía histerética, lo cual implica que en la junta de alabeo como tal se forma una rótula plástica. Adicional a la resistencia sísmica, dicha conexión debe diseñarse para resistir la demanda de cortante horizontal para el comportamiento de sección compuesta de la superestructura.



**Figura 4.-** Esquema idealizado de la deformada de la junta de alabeo viga-losa de puente: (a) Esquema de la junta; (b) Esquema del angular a tensión. (Adaptado de Weldon y Kurama, 2010).

En este caso la descripción del comportamiento se basa en el trabajo de Weldon y Kurama (2010), quienes desarrollaron una solución para vigas de acople de concreto prefabricado utilizando acero de postensión desadherida como en el caso del sistema híbrido, y combinándolo con angulares de acero en la parte superior e inferior de la sección transversal de cada extremo para proveer disipación de energía durante un evento sísmico. Por lo tanto, el estado de fluencia es caracterizado por la rigidez rotacional elástica inicial,  $K_{ia\alpha}$ , por medio de la siguiente ecuación:

$$K_{ia\alpha} = \frac{3 \cdot l_{g2} \cdot E_{as} \cdot I_a \cdot (b_b + \frac{t_a}{2}) \cdot \left[ N_{at} \cdot \left( \frac{f_{ay} \cdot l_a \cdot t_a^2}{2 \cdot l_{g2}} \right) + P_{tl} \right] \cdot b_b + \left( \frac{f_{ay} \cdot l_a \cdot t_a^2}{2 \cdot l_{g2}} \right) \cdot N_{at} \cdot (b_b + t_a)}{f_{ay} \cdot l_a \cdot t_a^2 \cdot l_{g1}^3 \cdot \left( 1 + \frac{0,78 \cdot t_a^2}{l_{g1}^2} \right)} \quad [2]$$

donde  $b_b$  es el ancho de la viga de puente;  $t_a$  es el espesor de la pata del angular;  $f_{ay}$  es el esfuerzo de fluencia del acero del angular;  $l_a$  es la longitud del angular;  $l_{g1}$  es la longitud de la pata horizontal del angular que se asume actúa en voladizo;  $l_{g2}$  es la longitud efectiva entre rótulas plásticas de la pata horizontal del angular;  $E_{as}$  es el módulo de elasticidad del acero del angular;  $I_a$  es el momento de inercia de la sección transversal de la pata del angular;  $N_{at}$  es el número de angulares de acero a tensión;  $P_{tl}$  es el peso tributario de la losa.

### PROCEDIMIENTO DE DISEÑO SIMPLIFICADO DE CARGA LATERAL SÍSMICA PARA PUENTES VIGA-LOSA DE CONCRETO

Con el objetivo de desarrollar una propuesta paso a paso de análisis y diseño para puentes viga-losa de concreto con el sistema de diafragmas dúctiles, considere la Fig. 2 en la cual se muestra la deformada del puente en el extremo sometido a una fuerza  $F_T$  la cual se representa la acción sísmica, ya sea elástica o inelástica, en un diseño basado en fuerzas.

# Congreso Estructuras 2015

## XIII Seminario de Ingeniería Estructural y Sísmica

5 al 7 de agosto 2015, Hotel Barceló San José Palacio, Costa Rica

Por lo tanto, basándose en la propuesta hecha por Zahrai y Bruneau (1999) para puentes de acero, el procedimiento de diseño sísmico simplificado para puentes viga-losa de concreto es descrito por los siguientes pasos:

*Paso 1:* Escoja el valor del factor de reducción,  $R$ , y el respectivo valor de ductilidad,  $\mu$ .

*Paso 2:* Considere el puente como un sistema simplificado de resortes en serie cuya rigidez total equivalente es dada por la siguiente ecuación:

$$K_e = \frac{1}{\frac{1}{K^*} + \frac{1}{K_{extr}} + \frac{1}{K_{sub}}} \quad [3]$$

donde  $K^*$  es la rigidez lateral generalizada de la superestructura;  $K_{extr}$  es la rigidez lateral del sistema de diafragmas dúctiles en los extremos;  $K_{sub}$  es la rigidez lateral de la subestructura incluyendo los apoyos, bastiones, pilas, fundaciones y el suelo. Se debe verificar que el valor de  $K_{sub}$  es lo suficientemente alto como para ser ignorado en la Ec. 3 de aquí en adelante, con el objetivo de evitar demandas de ductilidad imprácticas sobre el sistema de diafragmas dúctiles (Zahrai y Bruneau, 1999).

*Paso 3:* En el caso de un diseño nuevo escoja las dimensiones y materiales del puente, y en el caso de la rehabilitación de un proyecto utilice las dimensiones y materiales constituyentes del puente existente.

*Paso 4:* Con la información del *Paso 3*, calcule la masa generalizada,  $m^*$ , y la rigidez lateral generalizada,  $K^*$ , ambos de la superestructura, asumiendo comportamiento de un sólo grado de libertad y los conceptos fundamentales de dinámica de estructuras.

*Paso 5:* Calcule la rigidez lateral del sistema de diafragmas en los extremos,  $K_{extr}$ , como la suma de todas las rigideces de sistemas de diafragmas dúctiles de los extremos,  $K_{SDD}$ , determinado por medio de la siguiente relación:

$$K_{SDD} = \frac{(2 \cdot n - 2) \cdot \left[ \frac{K_{iv} \cdot L_v \cdot s_b}{2} + \frac{K_{ia\alpha}}{(1 + \Omega) \cdot \left(1 + \frac{s_b}{L_v}\right)} \right] \cdot \left(1 + \frac{s_b}{L_v}\right)}{h_e^2} \quad [4]$$

donde  $n$  es el número de vigas de puente;  $s_b$  es la separación de las vigas de puente;  $\Omega$  es usado para tomar en cuenta la influencia de la flexibilidad de la losa de concreto prefabricado en la rigidez general. El término  $K_{iv}$  es calculado usando la Ec. 1, y  $K_{ia\alpha}$  es calculado usando la Ec. 2.

*Paso 6:* Obtenga el período fundamental equivalente lateral del puente, usando la siguiente ecuación:

$$T_e = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{m^*}{K_e}} \quad [5]$$

*Paso 7:* Calcule el cortante lateral elástico total,  $V_{elast}$ , por medio de la siguiente relación, la cual puede ser derivada usando principios fundamentales de dinámica de estructuras y considerando una función de forma sinusoidal:

$$V_{elast} = S_a \cdot \left(\frac{8 \cdot M \cdot g}{\pi^2}\right) \quad [6]$$

donde  $M$  es la masa total de la superestructura;  $S_a$  es el valor espectral de pseudoaceleración.

La fuerza lateral elástica por cada uno de los extremos del puente,  $V_{extr}$ , es dada por:

$$V_{extr} = \frac{V_{elast}}{(j+1)} \quad [7]$$

donde  $j$  es la cantidad de superestructuras simplemente apoyadas del puente.

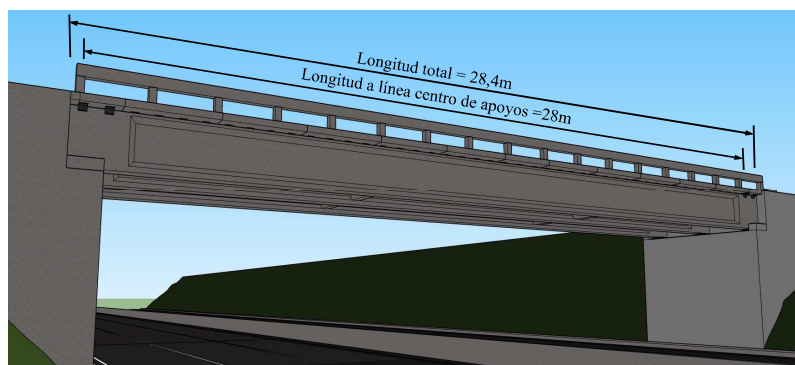
*Paso 8:* Por medio de la aproximación de "igual desplazamiento" obtenga el valor de cortante inelástico por extremo,  $V_{inel}$ , a partir de la curva fuerza-desplazamiento del sistema global de diafragmas dúctiles, y calcule el valor de  $R$ . Compare con el valor inicial propuesto en el *Paso 1* y de ser necesario modifique el sistema de diafragmas dúctiles según se requiera y regrese al *Paso 5*.

*Paso 9:* Como máximo, el valor de  $V_{inel}$  deberá ser la mitad de la resistencia lateral nominal de la subestructura.

*Paso 10:* La máxima deriva probable del puente, calculada utilizando el desplazamiento de fluencia del sistema global y el valor de  $\mu$  asociado a  $R$ , deberá ser menor o igual que 1%.

### CASO DE ESTUDIO

Con el objetivo de implementar el anterior análisis en condiciones prácticas, en lugar de utilizar el caso de un puente real existente, se propone una estructura hipotética que cumple las características dimensionales y de materiales de puentes típicos de Costa Rica. El puente prototipo escogido tiene una longitud de 28m entre apoyos, está compuesto de tres vigas prefabricadas/postensadas con un espaciamiento de 2,44m entre ellas, y una losa de concreto prefabricado con un ancho de 6,12m y un espesor de 0,19m (Ver Fig. 5). Podría ser el caso de la rehabilitación de un puente existente, por lo que es necesario cambiar por completo la superestructura o sólo substituir la losa por una de concreto prefabricado. También podría ser el caso de un puente nuevo 100% prefabricado.



**Figura 5.-** Vista lateral del puente prototipo a utilizar como caso de estudio.

En la Fig. 6 se muestran los resultados de aplicar el análisis sísmico simplificado a uno de los extremos del caso de estudio, en donde se indican los principales parámetros que caracterizan su comportamiento. El valor utilizado de  $R$  es de 2,25 lo cual equivale a una ductilidad de 3. Como se puede notar, en este caso los angulares de acero permanecen en el rango elástico incluso para el nivel de deriva máxima de diseño, situación que podría tomarse la decisión de cambiar a nivel de detallado para modificar las características de disipación de energía del sistema.

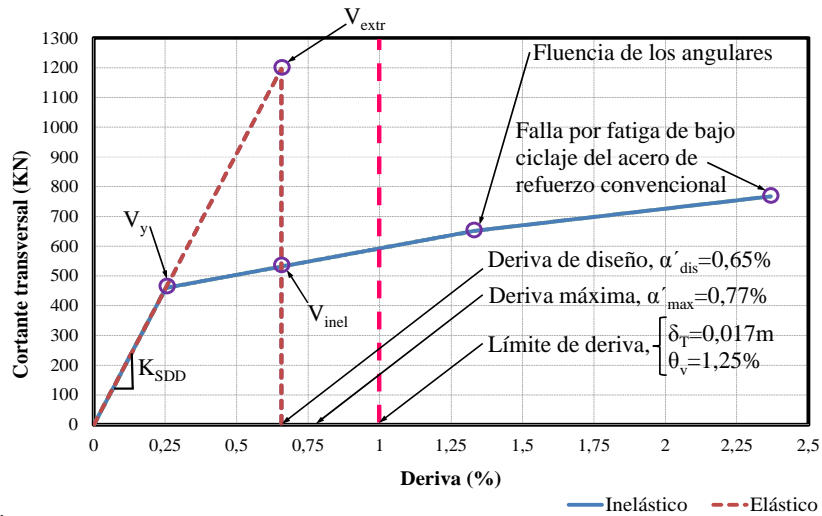


Figura 6.- Análisis sísmico simplificado del extremo del puente prototipo con diafragmas dúctiles.

### ENSAYO EXPERIMENTAL

Con el objetivo de probar el sistema de vigas diafragma dúctiles en condiciones de laboratorio se toma una sección de 0,60m de longitud de uno de los extremos del puente prototipo mostrado en la Fig. 5 tal y como se muestra en la Fig. 7. El ensayo a escala real se llevará a cabo en las instalaciones del LanammeUCR de la Universidad de Costa Rica e incluirá la medición de 33 galgas extensiométricas y 20 transductores de desplazamiento. Adicionalmente se utilizará una celda de carga para medir la variación de la fuerza de los torones durante el proceso de postensión y durante la ejecución del ensayo.

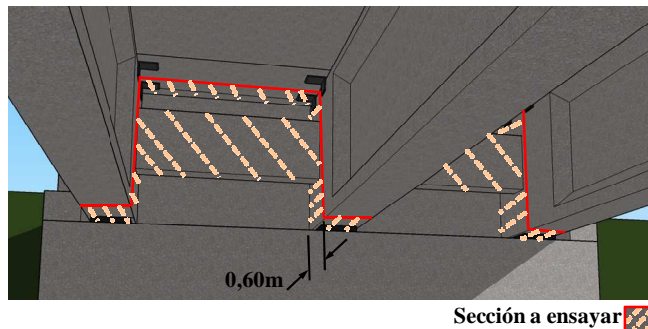


Figura 7.- Sección del puente prototipo a ser ensayada en el LanammeUCR.

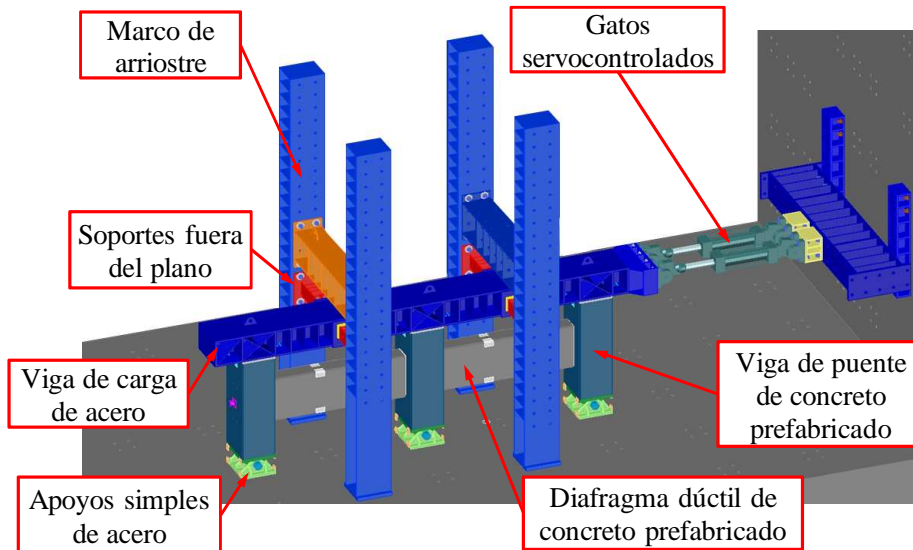
En la Fig.8 se puede observar un esquema del montaje propuesto del ensayo. Como se puede notar, en lugar de los apoyos elastoméricos mostrados en la Fig. 2 se utilizan apoyos simples de acero cuyo propósito es proveer una condición de borde de rotación ideal en la base de las vigas principales y adicionalmente resistir las fuerzas de levantamiento que se generan en las vigas externas producto de la fuerza lateral sísmica y la ausencia de la carga permanente de la superestructura.

Similar al caso anterior, en lugar de la losa de concreto prefabricado mostrada la Fig. 2 se utiliza una viga de carga de acero con una inercia de la sección transversal 4 veces mayor, y es el elemento por medio del cual se transite la fuerza lateral  $F_T$  a través del uso de dos gatos servocontrolados. Si se utilizara la losa de concreto prefabricado en el ensayo, la misma estaría sometida a fuerzas axiales longitudinales alternadas de compresión y tensión de magnitud considerable que no sólo en



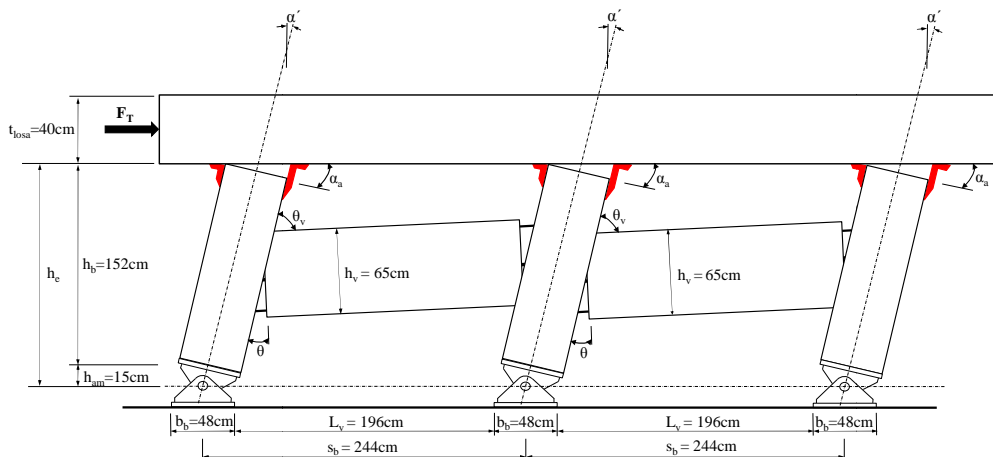
un puente real no se presentarían sino que además podrían alterar los resultados y la interpretación de los mismos.

Por último, los marcos de arrioste de acero trabajan en conjunto con los elementos denominados como soportes fuera del plano, para evitar desplazamientos distintos a los de la línea de acción de los gatos servocontrolados. Esto con el objetivo de poder obtener el comportamiento debido únicamente al desplazamiento lateral de la sección transversal del puente.



**Figura 8.-** Esquema del montaje del ensayo propuesto a realizarse en el LanammeUCR.

En la Fig. 9 se muestra un esquema de la cinemática del ensayo sometido a la fuerza lateral  $F_T$  según la metodología de análisis simplificado, así como las dimensiones del espécimen. La Fig. 10 compara las curvas teóricas Fuerza-Deriva del puente prototipo y la del ensayo experimental. Como se puede observar la principal consecuencia de utilizar la viga de carga de acero en lugar de la losa de concreto prefabricado es que el inicio de la fluencia de los angulares se presenta para una deriva menor, es decir, los angulares se vuelven más efectivos en la resistencia y disipación de energía, y es resultado directo de la diferencia en la rigidez entre ambos elementos. Esta curva teórica se debe comparar con la que se obtenga del ensayo real para verificar la idoneidad de la solución propuesta para predecir el comportamiento de la sección transversal.



**Figura 9.-** Cinemática del análisis simplificado propuesto para el sistema de diafragmas dúctiles del ensayo así como las dimensiones utilizadas (Ancho de vigas diafragma,  $b_v=25\text{cm}$ ).

# Congreso Estructuras 2015

XIII Seminario de Ingeniería Estructural y Sísmica

5 al 7 de agosto 2015, Hotel Barceló San José Palacio, Costa Rica

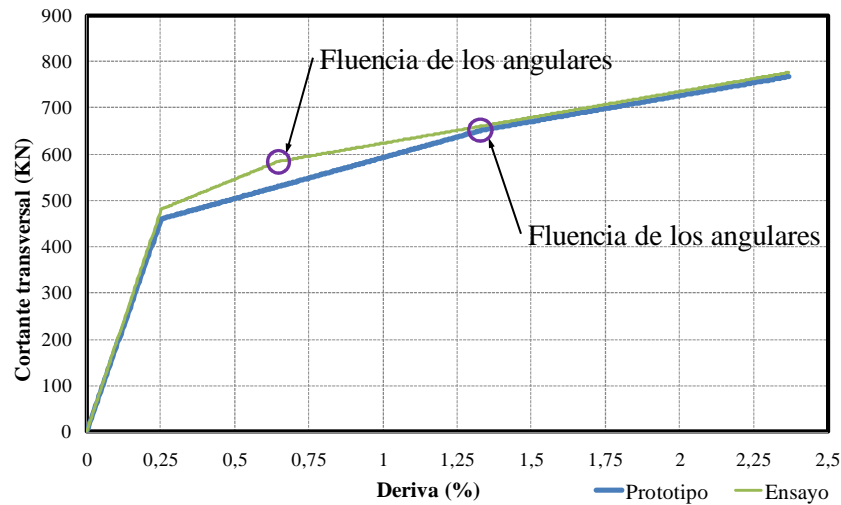


Figura 10.- Comparación de los resultados teóricos del puente prototipo y del ensayo experimental.

## CONCLUSIONES

1. Con el objetivo de rehabilitar puentes existente de concreto o llevar a cabo el diseño de nuevas estructuras en zonas de moderado a alto riesgo sísmico, es posible proponer alternativas para el uso de vigas diafragma dúctiles en soluciones ABC de puentes.
2. Tomando la geometría y materiales característicos de un puente prefabricado/preesforzado de uso común en Costa Rica, es posible aplicar el sistema de diafragmas dúctiles a un caso hipotético y resolver la mayoría de los detalles prácticos y constructivos.
3. Es posible predecir el comportamiento del sistema de diafragmas dúctiles por medio de tomar en cuenta la cinemática, las leyes constitutivas de los materiales y el equilibrio de las juntas y en general del comportamiento general de la sección transversal del puente.
4. El ensayo del sistema de diafragmas dúctiles permitirá obtener el comportamiento real Fuerza-Deriva y compararlo con el comportamiento teórico de la Fig. 10. Esta correlación entre ambas curvas permitirá concluir sobre la efectividad del procedimiento simplificado de análisis. El desempeño del sistema durante el ensayo así como las mediciones que se lleven a cabo, permitirán verificar la efectividad práctica de la solución propuesta.

## BIBLIOGRAFÍA

- Caltrans** (2006). "Visual Catalog of Reinforced Concrete Bridge Damage", *California Department of Transportation-Structure Maintenance and Investigations*, Junio 2006.
- Restrepo, José I. y Rahman, Amar** (2007). "Seismic Performance of Self-Centering Structural Walls Incorporating Energy Dissipators", *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol. 133 (11), Noviembre 2007, p.p. 1560-1568.
- Weldon, Brad D. y Kurama, YahyaC.** (2010). "Experimental Evaluation of Posttensioned Precast Concrete Coupling Beams", *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol. 136 (9), Setiembre 2010, p.p. 1066-1077.
- Yen, Wen-Huei Phillip et al.** (2010). "Post-Earthquake Reconnaissance Report on Transportation Infrastructure: Impact of the February 27, 2010, Offshore Maule Earthquake in Chile", *FHWA, Publication No. FHWA-HRT-11-030*, Octubre 2011, pp. 29- 90.
- Zahrai, Seyed M. y Bruneau, Michel** (1999). "Ductile End-Diaphragms for Seismic Retrofit of Slab-on-Girder Steel Bridges", *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol. 125 (1), Enero 1999, pp. 71-80.