

CONSIDERACIONES SOBRE RESISTENCIA AL COLAPSO DE PUENTES DE HORMIGÓN ARMADO Y PRETENSADO

María L. Gerbaudo
PhD. Student MSc. CE
Universitat Politècnica de València
mlgerbau@upv.es

José M. Adam
PhD. MSc. CE
Universitat Politècnica de València
joadmar@upv.es

Carlos F. Gerbaudo
MSc. Ingeniero Civil
Universidad Nacional de Córdoba
cgerbaudo@unc.edu.ar

RESUMEN

Una práctica habitual en el diseño de puentes de luces convencionales se basa en soluciones con tableros isostáticos formados por múltiples vigas simplemente apoyadas. En los últimos años, la evidencia empírica ha mostrado que numerosos puentes de esta tipología han colapsado frente al aumento de eventos extremos tales como sismos de gran magnitud, crecidas extraordinarias de cursos de agua o impacto de embarcaciones. Estas situaciones anormales han motivado a profesionales e investigadores a discutir y reflexionar sobre el concepto de robustez e integridad estructural de los puentes, referido a la aptitud de una estructura a resistir un colapso desproporcionado con respecto al daño inicial que lo provoca.

En el presente trabajo se discuten las estrategias de diseño para dotar a las estructuras de puentes de mayor resistencia al colapso. Principalmente se discuten dos estrategias de diseño: reducir la vulnerabilidad de la estructura con el objeto de prevenir o controlar el daño inicial local, y aumentar la robustez estructural para evitar la propagación del fallo inicial y el colapso desproporcionado.

En segundo término, se presentan dos casos de estudio de un puente provisto de un sistema de aislación sísmica y otro puente con adecuada robustez estructural. Finalmente se realizan conclusiones y recomendaciones sobre la base de los estudios y ejemplos de aplicación.

ABSTRACT

The design of conventional short span concrete bridges in general consists of solutions with isostatic deck formed by multiple simple supported beams. In recent years, it has been registered through empirical evidence that numerous bridges that have this configuration have collapsed due to abnormal event such as earthquakes, extreme flooding of a river or ship impact. The result has invited professionals and researchers to discuss and reflect on the concept of "Collapse resistance", referring to the ability of a structure not to suffer a disproportionate collapse.

In this technical work, design strategies are discussed to provide greater collapse resistance, then two case studies of bridges are presented, and finally conclusions and recommendations are presented based on the studies and application examples.

Organiza:

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la evidencia empírica ha mostrado que numerosos puentes han colapsado frente al aumento de eventos extremos tales como sismos de gran magnitud, crecidas extraordinarias de cursos de agua, impacto de embarcaciones, falla de elementos clave por deterioro o degradación de los materiales, etc. [1]. En el artículo de Adam et.al. [2] se presentan estadísticas actuales sobre cantidad y causas de colapso de puentes, pérdidas de vidas humanas y económicas asociadas y se presentan las líneas de investigación y de acción que se están desarrollando y aplicando en el diseño, control y mantenimiento de puentes con el objeto de prevenir el colapso desproporcionado de estas estructuras.

En el presente trabajo se definen los principales conceptos referidos a la robustez y resistencia al colapso de un sistema estructural y, en particular, se discuten las estrategias de diseño para dotar a las estructuras de puentes de mayor resistencia al colapso, mediante dos estrategias de diseño: reducir la vulnerabilidad de la estructura con el objeto de prevenir o controlar el daño inicial local, y aumentar la robustez estructural para evitar la propagación del fallo inicial y el colapso desproporcionado [3].

En segundo término, se presentan dos casos de estudio de un puente provisto de un sistema de aislación sísmica para reducir su vulnerabilidad estructural y otro puente dotado de adecuada robustez estructural, con el objeto de evaluar el comportamiento y respuesta de estos puentes ante un evento extremo.

Finalmente se realizan conclusiones y recomendaciones sobre la base de los estudios y análisis de los resultados de los ejemplos de aplicación.

DEFINICIONES

En la literatura especializada, se utilizan un gran número de términos y definiciones relacionadas con la resistencia al colapso progresivo de un sistema estructural. A continuación, se definen los principales términos de acuerdo con Starossek and Haberland [4] .

Robustez: el término robustez se refiere a la insensibilidad de una estructura frente a un fallo o daño local inicial. En términos cuantitativos la robustez puede ser asociado a la probabilidad de falla de una estructura frente a un determinado daño local $P[C/D]$, es decir, la probabilidad que ocurra el colapso desproporcionado C de la estructura como consecuencia de la propagación de un daño local inicial D .

Daño local inicial: Es el daño parcial o total D en un componente o subsistema de la estructura, localmente limitado, provocado por la acción de un evento anormal E . Es posible definir $P[D/E]$ como la probabilidad de daño inicial local D debido a la

Organiza:

ocurrencia de un evento anormal E , y se asocia al comportamiento local de los componentes de la estructura, y también se define con el término **vulnerabilidad** que describe la sensibilidad de una estructura a sufrir un daño o falla local inicial como consecuencia de un evento anormal.

Evento anormal: es un evento o acción de baja probabilidad de ocurrencia medida como $P[E]$, que en general no se encuentra definida en el conjunto de acciones especificadas por las normativas, o que su magnitud excede los valores definidos por norma.

Resistencia al colapso: o resistencia contra el colapso progresivo, es la insensibilidad de una estructura a un colapso desproporcionado originado por un evento accidental de baja probabilidad de ocurrencia. La resistencia al colapso es una propiedad asociada tanto a las características del sistema estructural como a las posibles causas que producen el daño local inicial.

El colapso progresivo se desarrolla en tres (3) etapas:

- 1) La ocurrencia de un evento anormal E que presenta una muy baja probabilidad de ocurrencia.
- 2) El evento anormal causa un daño inicial D , localmente limitado, que se manifiesta como la reducción de resistir carga por una debilidad seccional de un componente o la pérdida completa de un componente.
- 3) El daño inicial se propaga en forma progresiva resultando un colapso desproporcionado C .

La resistencia al colapso se puede medir mediante una cadena o combinación de probabilidades de acuerdo a la ecuación (1):

$$P[C] = P[C/D] \cdot P[D/E] \cdot P[E] \quad (1)$$

Otros términos que se utilizan para definir las características y aptitudes de una estructura en relación a su respuesta y comportamiento frente a un evento anormal son:

Continuidad: se refiere a la conexión de componentes estructurales con el objeto de obtener una continuidad estructural. La integridad, redundancia y resistencia local pueden mejorar mediante la continuidad estructural [5]

Ductilidad: es la habilidad de un componente o sistema estructural de soportar grandes deformaciones plásticas. La ductilidad tiene una gran influencia en el colapso progresivo y es un factor que incrementa la robustez de una estructura.

Integridad: se refiere a la condición de un sistema estructural o de sus componentes de permanecer intactos durante un definido período de vida útil de la estructura.

Organiza:

Redundancia: la redundancia estructural se refiere a contar con múltiples componentes que soportan carga o disponer de múltiples trayectorias de carga que pueden soportar cargas adicionales en caso de producirse una falla local. Si uno o más componentes fallan, el resto de la estructura tiene la capacidad para redistribuir las cargas y prevenir una falla global de la estructura. Redundancia se refiere en particular al método de diseño de trayectorias de cargas alternativas.

RESISTENCIA AL COLAPSO DE PUENTES

En relación a la resistencia al colapso de puentes definida por la ecuación (1), se pueden derivar posibles estrategias de diseño tendientes a reducir la probabilidad de colapso desproporcionado de un puente frente a eventos extremos, tales como sismos de gran magnitud, crecidas extraordinarias de cursos de agua, impacto de embarcaciones, etc. Estas situaciones extremas han motivado a profesionales e investigadores a discutir y reflexionar sobre las estrategias para evitar el colapso desproporcionado de un sistema estructural.

De acuerdo con Starossek and Haberland [4], básicamente se pueden mencionar tres estrategias de diseño para aumentar la resistencia al colapso:

1ra Estrategia: Prevenir la ocurrencia de un evento anormal: esta estrategia tiene como objeto reducir la probabilidad de ocurrencia del evento anormal, es decir, $P[E]$, y esto significa reducir el grado de exposición de la estructura frente a un determinado evento anormal. Es importante remarcar que la probabilidad de ocurrencia de un evento anormal usualmente no puede ser controlado por el ingeniero estructural, pero es posible controlar el grado de exposición de una estructura frente a un evento anormal mediante adecuadas medidas de diseño. Un ejemplo de reducción del valor $P[E]$ en el caso de un puente implantado sobre un canal de navegación se puede lograr mediante la inclusión de defensas contra impacto de embarcaciones, que en general, son estructuras de sacrificio que evitan o limitan la acción de la colisión de un barco sobre la propia infraestructura del puente.

2da Estrategia: Prevenir la ocurrencia de un daño inicial en consecuencia de la ocurrencia del evento anormal. La estructura está suficientemente protegida o esta provista de suficiente resistencia local de sus componentes “clave” de forma de no sufrir un daño significativo como consecuencia de un evento anormal. Esta estrategia se enfoca en el **comportamiento local** de los componentes de la estructura, y su objetivo es reducir la probabilidad de formación de un daño inicial local debido a la ocurrencia de un evento anormal, es decir, $P[D/E]$, lo que implica reducir la **vulnerabilidad de la estructura**. Un ejemplo de reducción de la vulnerabilidad de una estructura puede ser el refuerzo de los componentes clave de la estructura con el objeto de evitar el daño inicial local, la inclusión de un sistema de monitoreo en tiempo real de los componentes clave de la estructura con el objeto de controlar y limitar el

Organiza:

daño inicial mediante medidas de acción que se disparan como consecuencias del plan de monitoreo o la inclusión de dispositivos de aislación sísmica o sistemas de disipación de energía y/o amortiguamiento adicional que evitan o limitan los daños en los componentes clave de la estructura.

3ra Estrategia: Prevenir la propagación de la falla como consecuencia de un daño inicial que origine un colapso desproporcionado. La estructura debe estar diseñada para limitar o controlar la propagación de la falla inicial. Esta estrategia concierne al comportamiento global del sistema estructural, y es una propiedad denominada **robustez estructural**, que tiene por objeto la reducción de la probabilidad del colapso desproporcionado como consecuencia de un daño local inicial, es decir, $P[C/D]$. Una segunda posibilidad de prevenir la propagación de la falla inicial es mediante “**segmentación**”, donde la falla inicial es limitada por aislamiento de la parte dañada del resto de la estructura mediante los denominados segmentos de borde. La cantidad, ubicación y tipología de los segmentos de borde son adoptados por el diseñador en función de los objetivos de diseño. Mayores detalles de estrategias de elección de los segmentos de borde y tipo de fusibles estructurales pueden ser encontrados en la referencia bibliográfica Gerbaudo, M.L. [6]. Un ejemplo de robustez estructural es dotar al sistema estructural de trayectorias de carga alternativas que se activan ante la ocurrencia de una falla local, por ejemplo, mediante continuidad estructural de los componentes o la incorporación de componentes y/o refuerzos que aumente la redundancia estructural del sistema.

La primera y segunda estrategia que tienen por objetivo la reducción de la exposición y la vulnerabilidad de la estructura podrían ser denominadas “prevención del daño inicial”, la tercera estrategia que tiene por objeto brindar robustez estructural podría ser titulada “prevención de la propagación de la falla desproporcionada”. Las dos estrategias de reducir la vulnerabilidad y proveer robustez pueden ser combinadas en una estrategia de diseño para aumentar la resistencia al colapso de un sistema estructural.

CASOS DE ESTUDIO

En el presente apartado se analizan dos casos de diseño de estructuras de puentes que presentan una adecuada resistencia al colapso.

En primer término, se muestra el ejemplo del diseño de los Viaductos Carreteros del Camino de Altas Cumbres, RP 34, Córdoba, Argentina y en segundo término se presenta el diseño y comportamiento estructural del Puente sobre el Arroyo Chaján en la RN8, Córdoba, Argentina.

Caso 1: Viaductos con aislación sísmica

El caso en estudio corresponde a la utilización de dispositivos de aislación sísmica en un conjunto de viaductos de gran altura emplazados en zona sísmica en el “Camino

Organiza:

de las Altas Cumbres”, Córdoba, Argentina [7]. En particular, se analiza el caso del Viaducto 1 de una longitud total de 239 m, compuesto por 6 tramos de aproximadamente 40 m de luz parcial cada uno, y una altura máxima de pila del orden de 60 m. La sección transversal está constituida por cinco (5) vigas se sección “U” de hormigón pretensado con una losa superior semiprefabricada de hormigón armado. En la Figura 1 se muestra la configuración estructural del Viaducto 1.

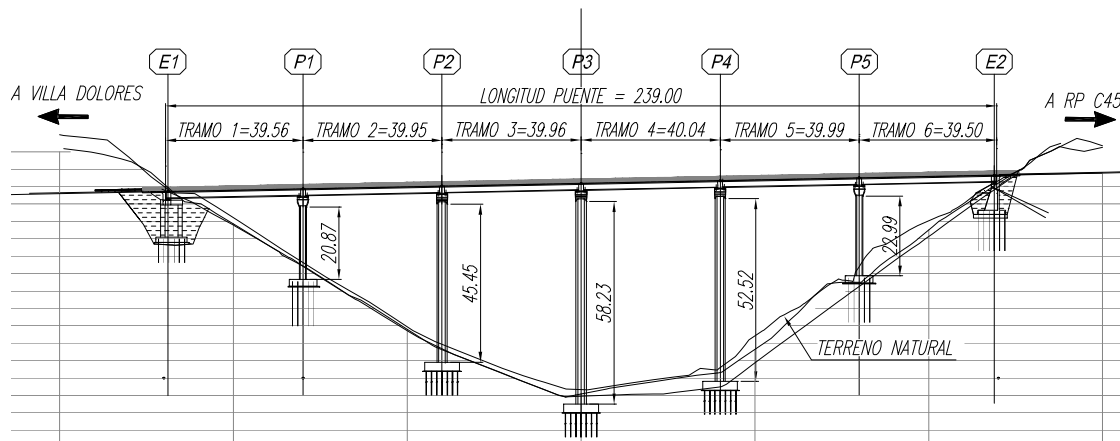


Figura 1. Configuración estructural longitudinal del Viaducto 1

El sistema de aislación sísmica tiene por objeto lograr una reducción en la demanda de deformaciones y esfuerzos en pilas, estribos y fundaciones mediante la concentración de deformaciones en los aisladores flexibles para escenarios sísmicos, y control de vibraciones y deformaciones para los estados de servicio originados por las cargas móviles de tránsito, frenado, viento, efectos de retracción y fluencia del hormigón y variaciones térmicas actuantes en tableros continuos. Los aisladores sísmicos fueron colocados debajo de las vigas principales del tablero del viaducto, a razón de un aislador en cada apoyo de viga.

Los dispositivos seleccionados fueron aisladores de goma natural armado con chapas y provistos de un núcleo central de plomo (aisladores tipo Lead Rubber Bearing “LRB”) [8].

Dependiendo de los niveles de deformación del aislador, la frecuencia de vibración del viaducto y masa modal del modo considerado, el funcionamiento de los aisladores con núcleo de plomo produce un aumento del periodo natural del viaducto y de la razón de amortiguamiento modal de la estructura, lo que tiene como consecuencia una reducción de la pseudo-aceleración, deformaciones y esfuerzos sísmicos sobre las pilas para una apropiada selección de la fuerza de fluencia del núcleo. En la Figura 2 se muestra un esquema de aislador con núcleo de plomo y en la Figura 3 se presenta una figura conceptual del comportamiento de una estructura aislada, donde el corrimiento del período fundamental hacia la cola del espectro y el aumento de la relación de amortiguamiento producen una significativa reducción de las fuerzas sísmicas que actúan sobre la estructura.

Organiza:

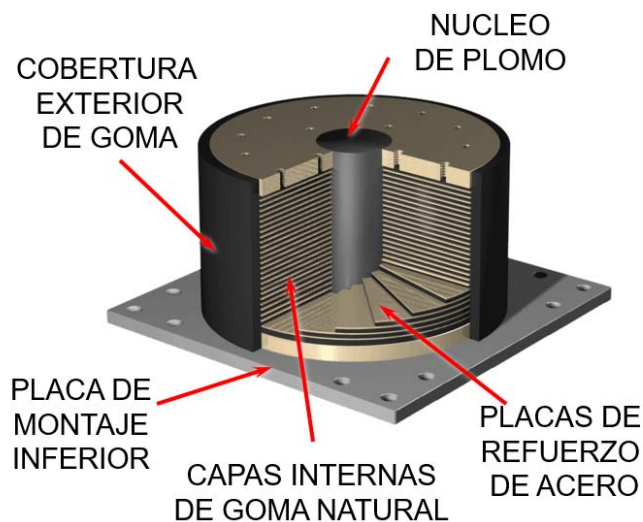


Figura 2. Esquema del aislador con núcleo de plomo (izquierda) y comportamiento durante las pruebas experimentales (derecha)
 (Fuente: Dynamic Isolation Systems - <https://www.dis-inc.com>)

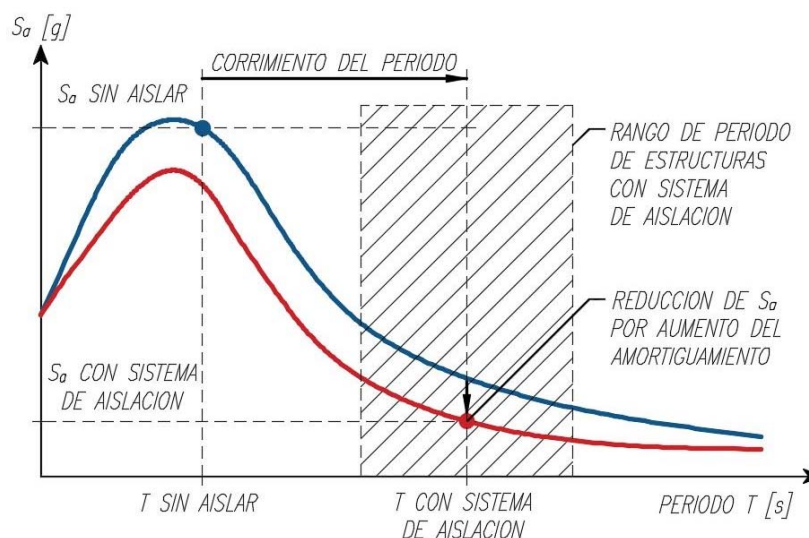


Figura 3. Esquema conceptual del comportamiento de una estructura aislada
 (Fuente: Referencia bibliográfica [7])

Es importante destacar que el uso de aisladores colocados en la interfase entre infraestructura y tablero permite concentrar una porción significativa de las deformaciones horizontales en los aisladores, y el diseño permite la adopción de una losa continua de toda la longitud del tablero sin juntas intermedias, aprovechando la rigidez horizontal del tablero para distribuir adecuadamente la demanda sísmica en pilas y estribos.

Organiza:

Calibrando adecuadamente las rigideces laterales de los aisladores elastoméricos y las capacidades en fluencia de los núcleos de plomo se logró encajar, en un determinado rango de valores relativamente acotado, los momentos flectores a los que están sometidas las pilas, lográndose así una uniformización en la geometría de las secciones transversales de columnas, con la consecuente disminución de costos en moldes de encofrados y sistemas constructivos. Paralelamente, esto permitió aprovechar la rigidez que aportan los estribos del viaducto, transfiriendo un porcentaje significativo del corte sísmico hacia estos elementos sin superar la capacidad geotécnica de extracción o arranque horizontal de la ladera del terreno donde se apoya el trasdós de los estribos, aliviando las sollicitaciones en las pilas, y, en consecuencia, reduciendo su momento de vuelco y el tamaño de sus fundaciones.

De esta manera, el sistema de aislamiento sísmico protege las pilas, evitando o minimizando la incursión en el rango plástico de los componentes de hormigón armado de la infraestructura, es decir, la ductilidad requerida es igual o menor de 1.0, con lo que se consigue reducir a un valor mínimo la probabilidad de daño estructural o falla inicial en las columnas del viaducto sometido a sismo, es decir disminuir $P[D/E]$, que un diseño convencional sismo-resistente requieren de la incursión en el campo plástico de dichas pilas, con requerimientos de ductilidad del orden de 3.0 o superiores, lo que implica la rotulación en la base de las columnas y grandes desplazamientos en la cabeza de las pilas, con el consiguiente peligro de colapso progresivo de la estructura en caso que el evento sísmico alcance o supere los valores de diseño.

Caso 2: Puente con tablero de viga continua

El caso de estudio corresponde a un puente de hormigón armado, sobre el Río Chaján en la Ruta Nacional N° 8, Córdoba, formado por un tablero de cuatro (4) vigas continuas con losa superior, de 85 m de longitud total, con 5 luces parciales de 15 m y dos voladizos extremos de 5 m de longitud cada uno, con pilas tipo pórtico transversal de dos columnas con viga dintel superior y bases de fundación de hormigón simple, y falsos estribos en los extremos del puente. En la Figura 4 se muestra una imagen general del puente en estudio.

Organiza:



Figura 4. Vista general del Puente sobre A° Chaján en RN N°8

Luego del relevamiento e inspección del puente, se pudo observar signos de procesos erosivos en el cauce del río, y un marcado descenso general de todas las pilas del puente, registrándose el mayor descenso en la columna de aguas abajo de la Pila P3 de un valor de 14.6 cm, un valor de descenso de 7.4 cm en la columna de aguas arriba de P3, mientras que en las columnas de la Pila P4 se relevaron descensos de 8.9 cm en ambas columnas. En la Figura 5 se muestran los descensos registrados en todas las pilas del puente.

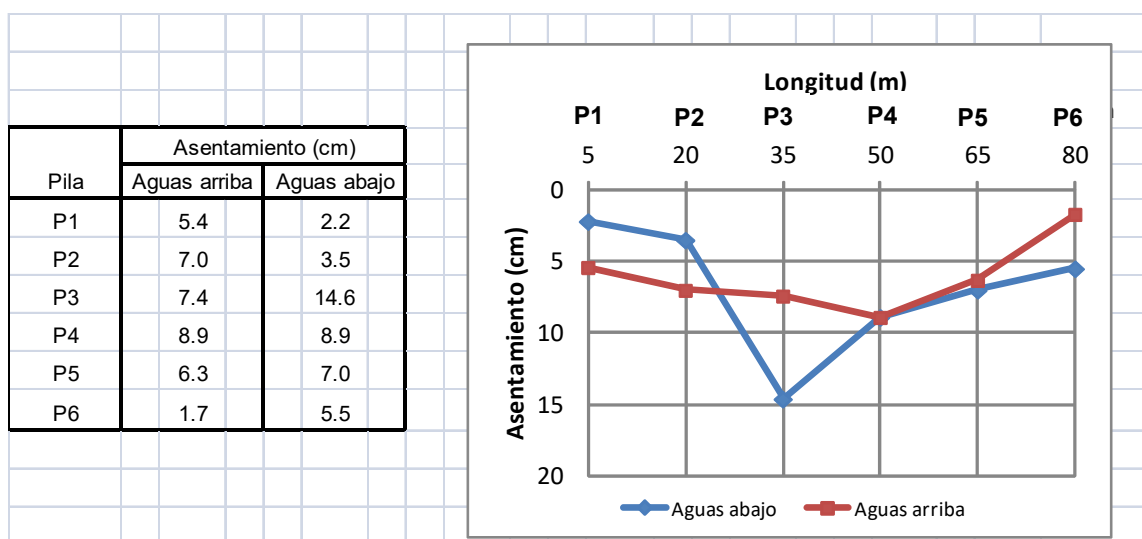


Figura 5. Asentamiento de columnas de pilas respecto al plano de referencia

Organiza:

Con el propósito de evaluar el comportamiento y la seguridad estructural del puente, se realizó un análisis numérico utilizando el Método de Elementos Aplicados (Applied Element Method, AEM) mediante el software "Extreme Loading" [9]. Este enfoque permite simular los descensos en los apoyos y la respuesta no lineal del hormigón armado. El AEM proporciona una representación precisa de todas las fases del comportamiento estructural, desde la etapa elástica hasta la propagación de las fisuras y la incursión en el campo elástico y, finalmente, el colapso de la estructura con grandes deformaciones. En la Figura 6 se presenta el modelo numérico no lineal AEM empleado para evaluar la respuesta del puente en estudio ante el descenso de sus apoyos.

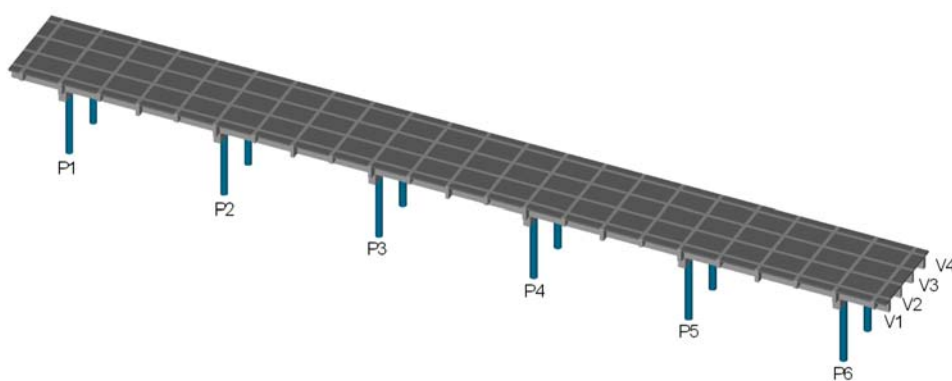


Figura 6. Modelo numérico no lineal del puente con AEM

El Método de Elementos Aplicados, utilizado para representar el puente, se basa en pequeños elementos rígidos conectados entre sí a través de resortes no lineales que representan la ley constitutiva del material. Cada elemento posee seis grados de libertad: tres traslacionales y tres rotacionales, lo que permite una reducción del costo computacional en relación con el método clásico de Elementos Finitos Sólidos. Para los análisis realizados en el Puente sobre el Arroyo Chaján, el hormigón se modeló utilizando elementos sólidos, mientras que las barras de armadura de refuerzo se representaron mediante resortes ubicados alineados en el baricentro de cada armadura. Mayores referencias sobre el Método de los Elementos Aplicados se encuentran en la referencia [9].

Luego del armado de la geometría del modelo numérico y asignar las características mecánicas de los materiales, se procedió a la introducción de las cargas. El puente fue verificado con dos disposiciones distintas de sobrecarga. Además del peso propio y carga permanente, se introdujo dos aplanadoras A-30 mediante cargas concentradas, y una sobrecarga distribuida de 5,85 kN/m² ubicada en los vanos que generan los máximos momentos positivos y negativos en las vigas principales. La carga de las dos aplanadoras se representó mediante cuatro fuerzas puntuales: dos rodillos traseros de 172,9 kN y dos rodillos delanteros de 121,9 kN. En las Figuras 8 y

Organiza:

9 se muestra el esquema de sobrecargas adoptadas para el análisis del comportamiento del puente para momento positivo y negativo respectivamente [10].

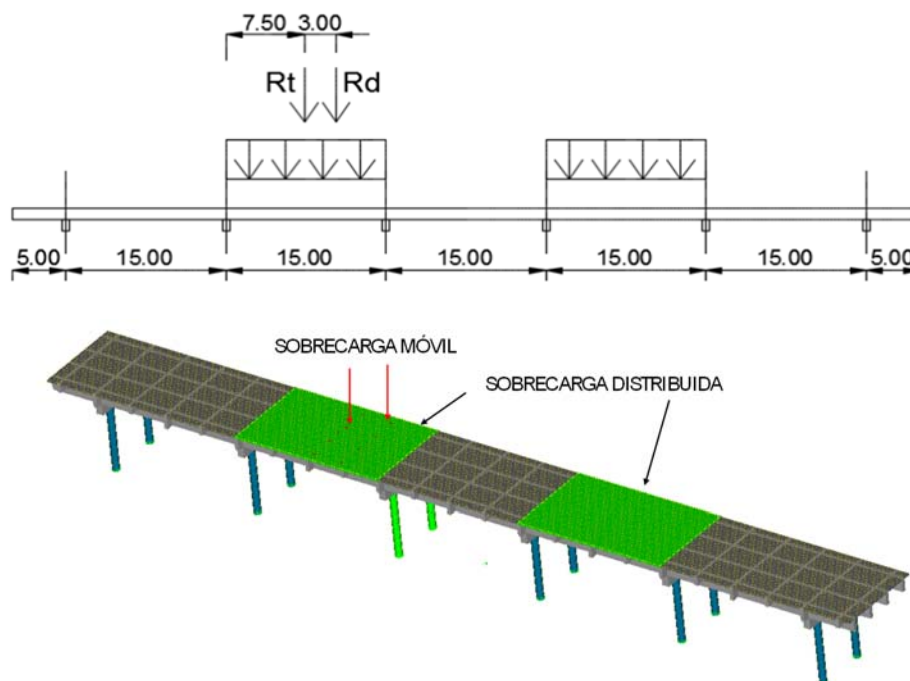


Figura 8. Posición de la sobrecarga móvil en el modelo numérico para $M(+)$

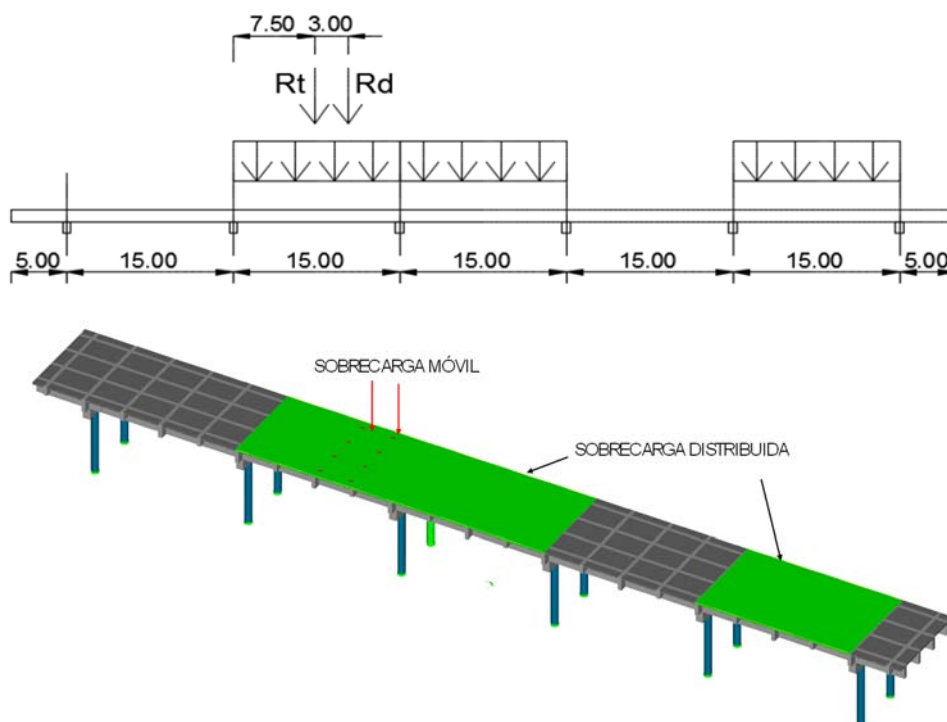
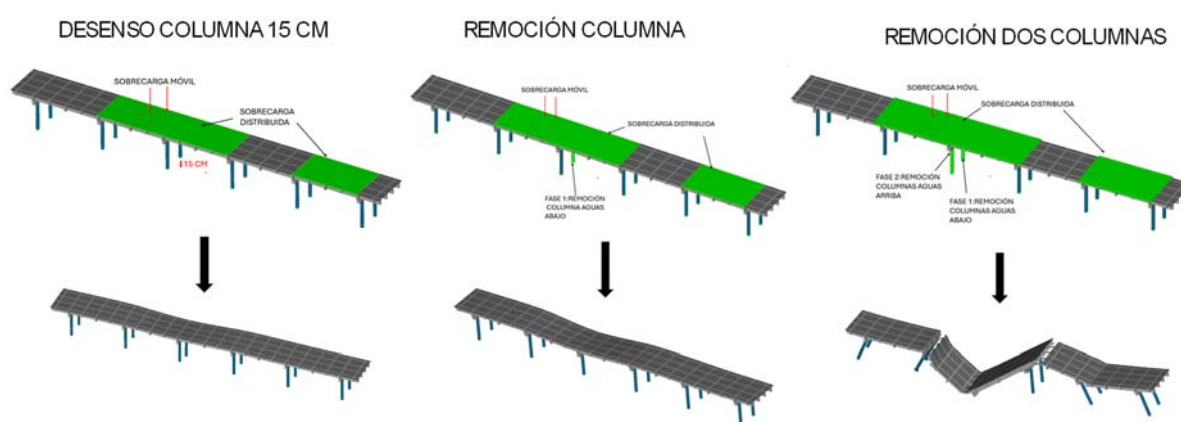


Figura 9. Posición de la sobrecarga móvil en el modelo numérico para $M(-)$

Organiza:

Para evaluar la robustez del Puente sobre el Arroyo Chaján, se han planteado dos situaciones de análisis: el descenso de 15 cm y la eliminación completa de la columna de aguas debajo de la Pila 3. En ambas situaciones, el puente no colapsa, aunque presenta secciones de las vigas principales en estado plástico por fluencia del acero y una fisuración notable. Además, se ha modelado una tercera situación: eliminar las columnas de la Pila 3, para avaluar la resistencia al colapso de la estructura. En este escenario, el puente colapsa, lo que revela los límites de su capacidad de carga y resistencia al colapso estructural. En la Figura 10 se muestran los 3 escenarios planteados para el caso de estudio.



*Figura 10. Escenarios planteados para el análisis de resistencia al colapso:
(i) descenso de columna, (ii) remoción de una columna y (iii) remoción de dos columnas*

Los análisis realizados a partir de la configuración deformada de la estructura revelan que, en algunos sectores locales, se supera la capacidad de diseño a flexión del elemento. Esta respuesta es característica del comportamiento de una viga continua hiperestática, donde los esfuerzos se redistribuyen desde los sectores más solicitados, que se plastifican, hacia los sectores menos solicitados. Esta redistribución de esfuerzos es fundamental para la robustez del puente, ya que permite que la estructura soporte cargas adicionales incluso cuando ciertos componentes de la estructura incursionan en el campo plástico.

En la Figura 11 se presenta la respuesta del modelo numérico no lineal, mostrando en color rojo los sectores donde se produce la plastificación de las vigas del tablero, en particular la viga V4 ubicada aguas abajo, entre las pilas P2, P3 y P4. Los tres modelos ilustran la degradación del puente bajo diferentes condiciones de apoyo. En el caso del descenso de 15 cm de la columna de aguas abajo de P3, las zonas de plastificación de las vigas se limitan a áreas específicas próximas a la columna que descende, demostrando que la estructura presenta una capacidad de admitir descensos de apoyos mediante la redistribución de solicitaciones, sin alcanzar el

Organiza:

colapso. Al remover una columna de aguas abajo de P3, el tablero del puente desciende 21 cm y se ve afectado prácticamente en su totalidad, mostrando un impacto significativo en la integridad estructural, pero, aun para la pérdida de una columna, el puente se mantiene en una posición de equilibrio y no colapsa. Finalmente, en el modelo que simula la remoción de dos columnas de P3, la estructura sufre un colapso progresivo, indicando que la pérdida de múltiples soportes excede la capacidad del puente para redistribuir los esfuerzos y mantener su estabilidad.

Estos análisis destacan la robustez del puente en términos de su capacidad para soportar daños significativos sin un colapso desproporcionado. La estructura demuestra una capacidad notable para redistribuir cargas y mantener su integridad hasta un cierto límite de daños, lo que es esencial para garantizar la seguridad y estabilidad del puente sometido a eventos anormales. En la Figura 11 se muestra la respuesta del puente ante los 3 escenarios de análisis.

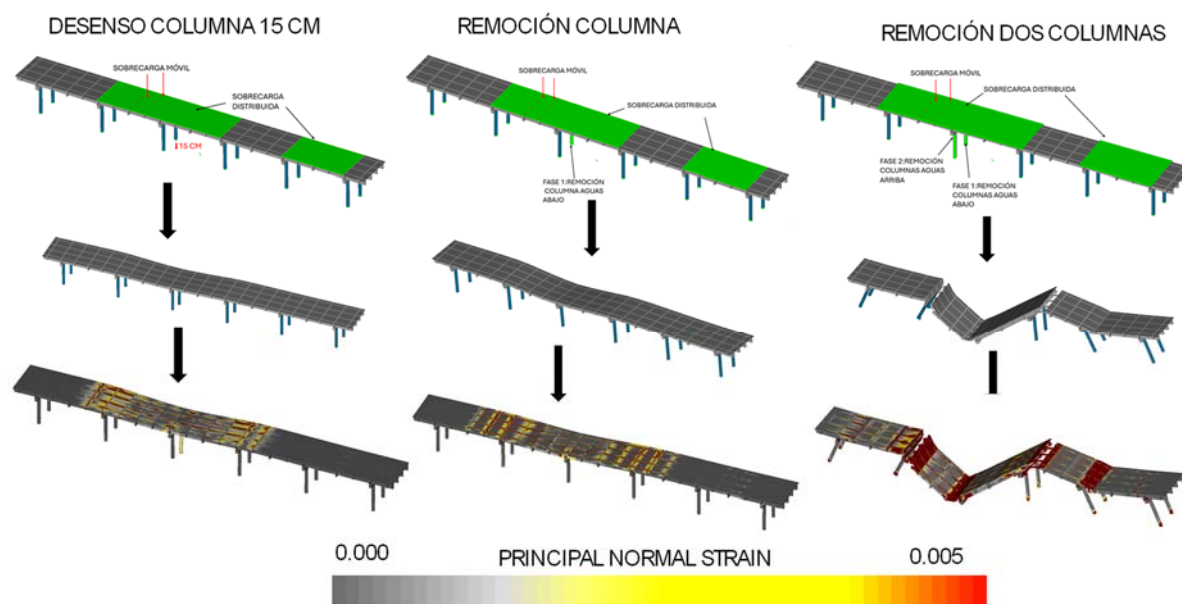


Figura 11. Solicitaciones de tensiones en la estructura del puente para los tres escenarios de análisis

Asimismo, el modelo no lineal desarrollado muestra que la estructura permanece estable para los valores de desplazamiento en las fundaciones relevados, y podría mantener la estabilidad para la eliminación de la totalidad de una columna de una pila, lo que muestra que ante una falla local como podría ser el descenso de una pila por erosión, no se produce la propagación de la falla y el colapso desproporcionado de la estructura, debido a la robustez estructural que presenta el tablero de viga continua. En la Figura 12 se muestra la respuesta del modelo para un desplazamiento de 15 cm.

Organiza:



Figura 12. Tensiones principales de tracción compatibles con los patrones de fisuración observados en el puente

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A lo largo de los últimos años, y ante la evidencia y registros de numerosos colapsos de puentes con pérdidas de vidas humanas y económicas, la seguridad estructural ha sido el foco de numerosas investigaciones, que se van traduciendo en las normativas y recomendaciones de diseño, y en propuestas y desarrollos actualmente en vigencia, con el objetivo de mejorar la resistencia al colapso de las estructuras, y en particular, de los puentes.

Los profesionales de la ingeniería estructural e investigadores han logrado una mayor concientización sobre la seguridad estructural ante acontecimientos anormales, catástrofes naturales y actos malintencionados.

Es importante remarcar que la probabilidad de ocurrencia de un evento anormal usualmente no puede ser controlado por el ingeniero estructural, pero si es posible controlar el grado de exposición de una estructura frente a un evento anormal mediante adecuadas medidas de diseño, y también se puede incidir en forma directa en las propiedades de vulnerabilidad y robustez de una estructura como consecuencia del diseño estructural, lo que puede mejorar notablemente la resistencia al colapso de un puente.

A través de dos casos de estudio presentados en este trabajo es posible mostrar y comprender los mecanismos resistentes que se activan en los puentes para evitar un colapso total de la estructura. El diseño de los Viaductos Carreteros del Camino de

Organiza:

Altas Cumbres permite reducir la vulnerabilidad a través de un sistema de aislación sísmica. Por otro lado, las simulaciones numéricas de un puente de hormigón armado sobre el Río Chaján, con un tablero de vigas continuas muestra el concepto de robustez estructural, lo que permite evitar el colapso progresivo del puente frente a asentamientos y eliminación de una columna producto de la erosión del cauce del río.

Es importante destacar que es posible combinar en un mismo diseño medidas de reducción de la vulnerabilidad y aumento de la robustez, con la consiguiente reducción de la probabilidad de colapso progresivo de la estructura.

Finalmente, es importante mencionar que actualmente se están realizando grandes esfuerzos y avances científicos e ingenieriles en el campo de la resistencia a colapso de las estructuras, existiendo numerosas líneas de investigación en el campo del colapso progresivo.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. Morgese, F. Ansari, M. Domaneschi, and G. P. Cimellaro, "Post-collapse analysis of Morandi's Polcevera viaduct in Genoa Italy," *J Civ Struct Health Monit*, vol. 10, no. 1, pp. 69–85, Feb. 2020, doi: 10.1007/s13349-019-00370-7.
- [2] J. M. Adam, N. Makoond, B. Riveiro, and M. Buitrago, "Risks of bridge collapses are real and set to rise — here's why," *Nature*, vol. 629, pp. 1001–1003, Apr. 08, 2024. doi: 10.3389/fbuil.2015.00003.
- [3] D. O. Dusenberry, "New SEI/ASCE Disproportionate Collapse Mitigation Standard," *Journal of Structural Engineering*, vol. 148, no. 4, Apr. 2022, doi: 10.1061/(asce)st.1943-541x.0003305.
- [4] U. Starossek and M. Haberland, "Robustness of structures," *International Journal of Lifecycle Performance Engineering*, vol. 1, no. 1, p. 3, 2012, doi: 10.1504/ijlcpe.2012.051279.
- [5] N. Makoond, A. Setiawan, S. L. Orton, and J. M. Adam, "The effect of continuity reinforcement on the progression of collapse in reinforced concrete buildings," *Structures*, vol. 61, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.istruc.2024.105981.
- [6] M. L. Gerbaudo, "Segmentación Basada en Fusibles Estructurales para Limitar Colapsos Desproporcionados en Edificios: Criterios de Diseño," 2023.
- [7] C. F. Gerbaudo, J. A. Inaudi, and G. M. Gerbaudo, "Diseño de los Viaductos Altas Cumbre," *"ie" de las Asociación de Ingenieros Estructurales*, vol. Edición Digital 69, pp. 8–16, Sep. 2021.
- [8] X. Chen, S. Wu, J. Li, Z. Guan, and N. Xiang, "Seismic performance assessment and design procedure of base-isolated bridges with lead-

Organiza:



rubber-bearing and negative stiffness springs (LRB-NS),” *Eng Struct*, vol. 306, May 2024, doi: 10.1016/j.engstruct.2024.117871.

- [9] Applied Science International., “Extreme Loading for Structures,” *Theoretical Manual*, vol. 108. 2021.
- [10] Vialidad Nacional, *BASES PARA EL CALCULO DE PUENTES DE HORMIGÓN ARMADO*. 1952.

Organiza:



Tel/Fax: [+54] 11 5252.8838 | Whatsapp: [+54 9] 11 3180.3746 | Hipólito Yrigoyen 1144 Piso 1° - Of. 2 | Buenos Aires
Horario de atención: de lunes a viernes de 13:00 a 18:00 hs. | Mail: info@jornadasaie.org.ar - www.jornadasaie.org.ar