

PROPUESTA DE REFORZAMIENTO DE PUENTES DE CONCRETO MEDIANTE TÉCNICAS DE PRETENSIÓN EXTERIOR

Ronald TORRES¹, María Luisa DÍAZ¹, Duilio MARCIAL¹

RESUMEN

El envejecimiento de las infraestructuras y el incremento de las cargas vehiculares, que a menudo superan las previsiones de diseño, representan un desafío crítico para la gestión de puentes de concreto a nivel nacional e internacional. Este trabajo propone y evalúa experimentalmente una técnica de reforzamiento para tableros de puentes, basada en la combinación de pretensado exterior y la adición de elementos metálicos. El objetivo principal es restaurar y aumentar la capacidad portante de estructuras dañadas o deficientes, de manera eficiente y con mínima interferencia al tráfico. La metodología consistió en la construcción de un modelo a escala real de un tablero típico, compuesto por viguetas pretensadas y losa de concreto. Este modelo fue sometido a un proceso de envejecimiento acelerado mediante cargas cíclicas que inducían un estado de fisuración controlado, simulando el daño por servicio. Posteriormente, se reparó y reforzó aplicando un sistema de pretensado exterior con una fuerza efectiva de 28 toneladas, complementado con rigidizadores y desviadores metálicos. Los resultados de los ensayos de flexión hasta la rotura demostraron un incremento en el momento resistente último mayor al 80% en comparación con el modelo sin reforzar, superando ampliamente el objetivo inicial del 33%. Se concluye que la técnica propuesta es altamente efectiva para recuperar y mejorar sustancialmente la capacidad de carga de tableros de puentes, ofreciendo una solución viable y de rápida ejecución para su adaptación a las exigencias de los modernos trenes de carga.

ABSTRACT

Proposal for reinforcement of concrete bridges using external pretension techniques

The aging of infrastructure and the increase in vehicular loads, which often exceed design forecasts, represent a critical challenge for the management of concrete bridges both nationally and internationally. This study proposes and experimentally evaluates a strengthening technique for bridge decks, based on the combination of external prestressing and the addition of metal elements. The main objective is to restore and enhance the load-bearing capacity of damaged or deficient structures efficiently and with minimal traffic disruption. The methodology involved constructing a full-scale model of a typical deck, consisting of prestressed girders and a concrete slab. This model was subjected to an accelerated aging process through cyclic loads that induced a controlled cracking state, simulating in-service damage. Subsequently, it was repaired and strengthened by applying an external prestressing system with an effective force of 28 tons, complemented by metal stiffeners and deviators. The results of the bending tests up to failure demonstrated an increase in the ultimate resisting moment of more than 80% compared to the unreinforced model, significantly exceeding the initial target of 33%. It is concluded that the proposed technique is highly effective in recovering and substantially improving the load capacity of bridge decks, offering a viable and rapidly executable solution for adapting them to the demands of modern freight trains.

Palabras Clave: Puentes, reforzamiento de puentes, pretensado exterior, postensado, patología de puentes, reparación estructural.

Keywords: Bridges, bridge strengthening, external prestressing, post-tensioning, bridge pathology, structural repair.

INTRODUCCIÓN

El envejecimiento de las infraestructuras de puentes construidas en el siglo XX, particularmente después de la mitad del siglo pasado, ha creado un desafío global para los gestores de infraestructura. Se estima que más del 50% de los puentes en países de altos ingresos han superado la mitad de su vida útil

de diseño. A este desafío se suma el incremento significativo en el volumen y peso de los vehículos de carga, cuyas solicitaciones actuales a menudo exceden las previsiones de las normativas de diseño originales. Esta combinación de factores, deterioro material, obsolescencia normativa y aumento de cargas, compromete la capacidad portante, la funcionalidad y la seguridad de un gran número de estructuras a nivel mundial.

¹ Instituto de Materiales y Modelos Estructurales (IMME), Universidad Central de Venezuela. Correo-e.: ronald.imme@gmail.com

Casos emblemáticos de colapsos, como el puente Polcevera en Italia (2017) o el puente Carola en Alemania (2024), subrayan las graves consecuencias de no gestionar adecuadamente la degradación y las pérdidas de pretensado en estructuras de concreto.

Frente a esta problemática, la comunidad técnica internacional ha centrado sus esfuerzos en desarrollar métodos de evaluación y rehabilitación que sean efectivos, sostenibles y mínimamente intrusivos. Dentro de las técnicas de reforzamiento, el pretensado exterior ha resurgido como una alternativa particularmente atractiva. Originalmente concebida para el fortalecimiento de puentes, esta técnica consiste en la disposición de tendones no adheridos por fuera de la sección de concreto, anclados en los extremos de la pieza y, en muchos casos, guiados por desviadores intermedios. Sus ventajas son múltiples: permite ejecutar el refuerzo con mínima interrupción del tráfico, facilita la inspección y eventual sustitución de los tendones, reduce las pérdidas por fricción y puede aplicarse sin aumentar significativamente el peso muerto de la estructura. Ejemplos recientes de su aplicación exitosa incluyen el refuerzo del Victoria Bridge en Brisbane, Australia, donde se utilizaron tendones de postensado externo para extender la vida útil de la estructura y permitir el paso de vehículos de metro más pesados.

La necesidad de este tipo de intervenciones se ve acentuada por la evidencia experimental del daño que las cargas cíclicas pesadas inducen en elementos de tablero. Investigaciones recientes demuestran que el daño acumulado por cargas vehiculares tiene una influencia significativa en el comportamiento a fatiga de las losas de puentes, y que la aplicación de pretensado puede mitigar estos efectos al compensar las tensiones de fisuración. Asimismo, se ha observado que la capacidad a cortante de vigas de puentes pretensadas puede ser significativamente mayor que la estimada por normativas convencionales, lo que abre la puerta a optimizar las intervenciones de refuerzo mediante modelos analíticos más precisos.

A pesar de los avances tecnológicos y de la creciente popularidad del pretensado exterior, persisten limitaciones importantes a la hora de proyectar y verificar este tipo de refuerzos en estructuras existentes. Uno de los principales desafíos reside en la incertidumbre asociada al cálculo del grado de confiabilidad de las reparaciones, particularmente en lo que respecta a la variación de los esfuerzos después de las pérdidas diferidas, la capacidad de deformación restablecida y, en consecuencia, la nueva ductilidad del elemento reforzado. Un aspecto crítico en este proceso es el diseño y comportamiento de los elementos añadidos, desviadores y anclajes, cuya correcta funcionalidad es primordial para la efectividad del sistema. En estructuras en servicio, la selección de la ubicación óptima y la adaptación del diseño de estos componentes al espacio disponible representa un reto de ingeniería mayor.

Esta problemática, común a muchos países, ha sido documentada por diversos autores a nivel internacional. Trabajos como los de Tilly (2002) en el Reino Unido sobre la

gestión de estructuras postensadas, Chatelain et al. (1991) en Francia sobre reparación de puentes de hormigón pretensado, Petrangeli (1996) en Italia acerca de la experiencia con pretensado externo, y Radomski (1996) en Polonia sobre el fortalecimiento de puentes, sentaron las bases del conocimiento en esta área. Sin embargo, la evolución de los materiales, los métodos de análisis y las exigencias de carga justifican la necesidad de continuar investigando y validando experimentalmente las técnicas de reforzamiento, Abdulsahib, W. S., Ali, H. M., & Mahmoud, A. S. (2024).

El presente trabajo aborda esta necesidad mediante una investigación experimental que tiene como objetivo principal evaluar la efectividad de una técnica combinada de reforzamiento para tableros de puentes de concreto, basada en la aplicación de pretensado exterior y la adición de elementos metálicos. A través de un modelo de laboratorio sometido a un proceso de envejecimiento acelerado y posterior refuerzo, se busca cuantificar el incremento en la capacidad de carga, analizar la interacción entre los elementos existentes y los añadidos, y extraer conclusiones prácticas sobre el diseño de anclajes y desviadores que permitan optimizar futuras intervenciones en estructuras reales.

METODOLOGÍA

La investigación se desarrolló siguiendo un enfoque experimental controlado, con el objetivo de evaluar cuantitativamente la efectividad de una técnica combinada de reforzamiento mediante pretensado exterior y elementos metálicos. La metodología se estructuró en cuatro fases principales: (1) caracterización de materiales y elementos constitutivos, (2) construcción y descripción del prototipo, (3) simulación del daño por envejecimiento acelerado mediante cargas cíclicas, y (4) aplicación del sistema de refuerzo y evaluación de su desempeño hasta la rotura. Este enfoque metodológico sigue las recomendaciones de estudios experimentales previos sobre reforzamiento de estructuras de concreto, donde se prioriza la reproducibilidad y el control de variables.

Caracterización de Materiales y Elementos Prefabricados

Para la construcción del modelo de tablero, se utilizaron viguetas pretensadas prefabricadas, donadas por la empresa Sistensa, C.A., fabricadas con concreto de alta resistencia inicial y acero de pretensado de baja relajación. Previo al montaje del modelo, se procedió a la caracterización mecánica de estas viguetas mediante un ensayo de flexión a escala real (identificado como Ensayo 0). Este ensayo se realizó sobre una vigueta simplemente apoyada con una luz libre de 5,6 m, sometida a una carga concentrada aplicada en el centro del tramo, siguiendo los lineamientos de la norma ASTM C78/C78M-22 para la determinación de la resistencia a la flexión del concreto en elementos prefabricados.

El montaje del ensayo, mostrado esquemáticamente en la Figura 1, permitió obtener no solo los valores máximos de

momento flector, sino también generar zonas de cortante constante entre los apoyos y el punto de aplicación de la carga. Durante el ensayo, se registraron los momentos de agrietamiento y de rotura, así como la evolución del patrón de fisuración. El momento de agrietamiento se identificó con la aparición de la primera fisura visible, correspondiente a un valor de 9,8 ton·m. El momento de rotura se definió, según el criterio de la Norma COVENIN 1753-2006 para estructuras

de concreto armado, como el instante en que se observó el inicio del aplastamiento del concreto en la zona comprimida bajo la carga, acompañado de una profusión de grietas de tracción que alcanzaban dicha zona, registrándose un valor de 19,6 ton·m. La carga máxima aplicada durante el ensayo alcanzó los 24,9 ton·m, superando el momento de rotura teórico y proporcionando información sobre la reserva de resistencia y la ductilidad del elemento.



Figura 1. Vista de la prensa y de la vigueta antes de ser ensayada. Ensayo 0.

Diseño y Construcción del Prototipo de Tablero

Una vez caracterizadas las viguetas, se procedió al diseño y construcción de un modelo de tablero a escala real que reprodujera un sistema estructural típico de puentes: vigas prefabricadas que soportan una losa de concreto armado colaborante. El prototipo, cuyas dimensiones y detalles constructivos se presentan en las Figuras 2 y 3, consistió en dos viguetas pretensadas (las mismas que las caracterizadas) conectadas por una losa de concreto armado de 10 cm de espesor.

La losa se construyó utilizando una lámina de acero de 5 mm de espesor como encofrado perdido en la base, la cual se dejó permanentemente para actuar también como refuerzo adicional, siguiendo la filosofía de las losas mixtas acero-concreto ampliamente estudiadas en la literatura. Las caras laterales del encofrado se retiraron después del fraguado del concreto. El armado de la losa se dispuso en dos direcciones (malla ortogonal), utilizando cabillas corrugadas de acero de diámetro 1/2" (12,7 mm), con una separación que garantizara el comportamiento en dos direcciones y el control de la fisuración por retracción, de acuerdo con los requisitos de la normativa ACI 318 (2019) para losas armadas en dos direcciones. El concreto utilizado fue premezclado, con una resistencia a la compresión especificada de 233 kgf/cm², determinada mediante ensayos de probetas cilíndricas a los 28 días según la norma ASTM C39.

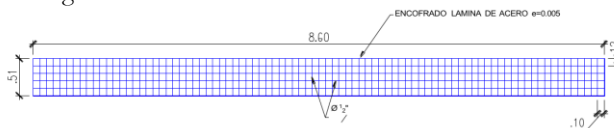


Figura 2. Modelo de Tablero de un Puente. Ensayo: 1,2 y 3.

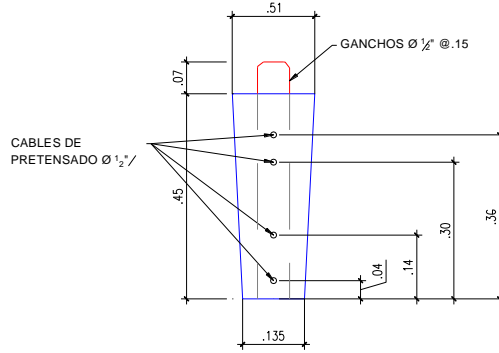


Figura 3. Sección transversal de Tablero de Puente. Ensayo: 1,2 y 3.

Simulación del Daño por Envejecimiento Acelerado

Para simular el deterioro acumulado por una estructura durante su vida útil, el prototipo fue sometido a un proceso de envejecimiento acelerado mediante la aplicación de ciclos de carga repetidos. Este procedimiento se fundamenta en los principios de la mecánica del daño acumulado, donde la aplicación de cargas por debajo de la rotura induce una degradación progresiva de la rigidez y la aparición de fisuración controlada.

El modelo se sometió a tres ciclos de carga (Ensayos 1, 2 y 3) en una configuración de flexión con cargas iguales aplicadas simétricamente (Figura 4). Esta disposición genera una zona central de momento flector constante y dos zonas laterales de cortante constante, permitiendo analizar el comportamiento del tablero bajo diferentes estados tensionales simultáneamente. En cada ciclo, se incurrió deliberadamente en la zona no lineal del comportamiento del material, produciendo agrietamiento pero evitando daños estructurales

significativos que pudieran comprometer la integridad del modelo para las fases posteriores de refuerzo. Este enfoque de "daño controlado" es consistente con metodologías experimentales utilizadas en estudios de rehabilitación de puentes.

Durante todos los ensayos, las deformaciones verticales (flechas) se midieron mediante parejas de flexímetros ubicados a lo largo del modelo, siguiendo un esquema de instrumentación que garantizara la detección de posibles desplazamientos laterales o momentos torsores parásitos. Los flexímetros se retiraban cuando las deformaciones alcanzaban niveles que pudieran dañarlos. Para cada nivel de carga, se registró meticulosamente la aparición de grietas, marcando sobre el modelo su ubicación, longitud y la carga correspondiente, lo que permitió controlar el avance del deterioro y verificar que las grietas de flexión no alcanzaran prematuramente la zona de compresión.

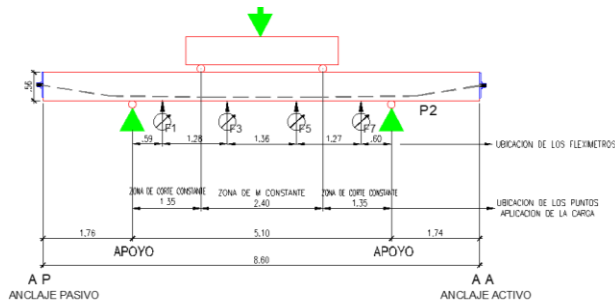


Figura 4. Ensayo del modelo del Tablero de puente. Esquema del ensayo.

Sistema de Reforzamiento Mediante Pretensado Exterior

Una vez completado el proceso de envejecimiento acelerado, se procedió a la fase de reforzamiento. El objetivo era incrementar la capacidad resistente del prototipo en al menos un 33% mediante la aplicación de un sistema de pretensado exterior combinado con elementos metálicos. La configuración final del refuerzo, desarrollada tras dos iteraciones preliminares (Ensayos 4 y 5) que evidenciaron problemas de deformación excesiva en los anclajes pasivos, consistió en:

- **Cierre de la sección:** Se colocaron planchas de acero de 6 mm de espesor en seis secciones del modelo para cerrar la sección transversal en forma de U (Figura 5). Estas planchas se fijaron al concreto de las vigas mediante cuatro tornillos de alta resistencia por sección, insertados en perforaciones realizadas en el concreto con ramplús metálicos expansivos. Este sistema de fijación sigue los principios de las conexiones mecánicas en estructuras mixtas, garantizando la transferencia de esfuerzos entre el concreto y el acero añadido.

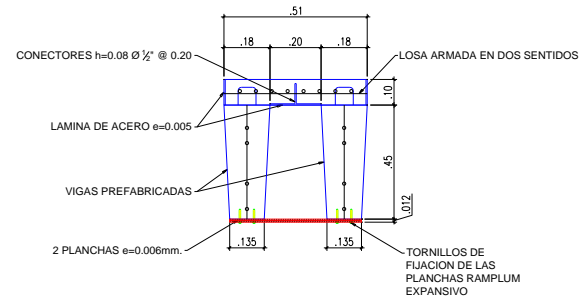


Figura 5. Sección transversal reforzada de Tablero de Puente (m).

- **Desviadores y rigidizadores transversales:** En cuatro secciones transversales, se instalaron planchas de acero rigidizadoras que actuaban como desviadores de los cables de pretensado (Figura 6). En los extremos, estas planchas funcionaban como tapas de cerramiento del modelo. Los agujeros de las planchas por donde pasaban los cables se mecanizaron con un acabado liso y redondeado para evitar concentraciones de tensiones y daños por fricción o corte en los tendones, siguiendo las recomendaciones de la PTI (Post-Tensioning Institute) para el diseño de desviadores en sistemas de pretensado exterior. La fijación de estas planchas se realizó mediante cordones de soldadura en el tope y la base, complementados con ángulos auxiliares soldados que actuaban como rigidizadores y facilitaban la colocación.

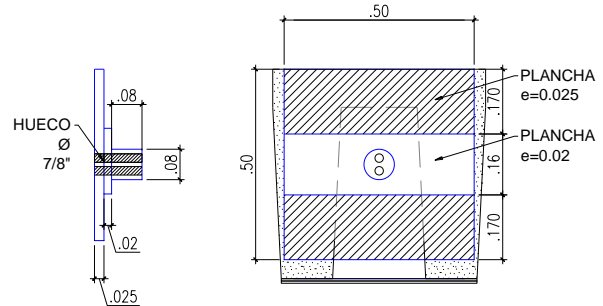


Figura 6. Sección transversal reforzada con plancha de anclaje en tablero de Puente (m).

- **Anclajes extremos:** Los anclajes de los cables se dispusieron sobre las caras extremas del conjunto, utilizando tapas fijadas con ángulos metálicos y pasadores soldados. Sobre esta plancha base se soldó una segunda plancha de menor tamaño para distribuir las concentraciones de tensiones generadas por el dispositivo de anclaje de los cables, un detalle crucial para evitar fallas locales por aplastamiento del concreto.
- **Tendones de pretensado:** Se dispusieron dos torones de pretensado, diseñados para una tensión máxima efectiva de 28 toneladas. Para monitorizar el comportamiento de los cables durante los ensayos, se instrumentó uno de ellos con un extensómetro, permitiendo registrar las variaciones de longitud y, mediante relaciones constitutivas, deducir las variaciones de tensión a lo largo del proceso de carga.

Procedimiento de Ensayo y Toma de Datos

Una vez implementado el sistema de refuerzo, el prototipo fue sometido a dos ensayos finales (Ensayos 6 y 7) bajo la misma configuración de carga simétrica mostrada en la Figura 4. En el Ensayo 6, la carga se aplicó hasta superar el objetivo de momento resistente aspirado. En el Ensayo 7, se decidió llevar el modelo hasta la rotura para determinar la capacidad última del sistema reforzado. En ambos ensayos, se mantuvo el mismo protocolo de medición de deformaciones, registro de fisuración y monitorización de la variación de tensión en los tendones, con el fin de evaluar el comportamiento integral de la estructura reforzada.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Comportamiento del Modelo sin Reforzar (Ensayos 0-3)

El ensayo de caracterización (Ensayo 0) de la vigueta individual proporcionó los parámetros base para evaluar el efecto del refuerzo. El momento de agrietamiento se registró en 9,8 ton·m, mientras que el momento de rotura, definido por el inicio del aplastamiento del concreto en la zona de compresión y la profusión de grietas de tracción, fue de 19,6 ton·m. La carga máxima aplicada alcanzó los 24,9 ton·m, evidenciando una reserva de resistencia post-rotura del 27% aproximadamente, característica de elementos con armadura de pretensado adecuadamente confinada. Este comportamiento dúctil es esencial para garantizar un margen de seguridad antes del colapso, tal como lo exigen las normativas modernas de diseño sísmico y de puentes.

En los ensayos de envejecimiento acelerado (Ensayos 1, 2 y 3), el prototipo de tablero fue sometido a ciclos de carga que incursionaron en el rango no lineal. Durante estos ciclos, se observó la aparición progresiva de fisuras por flexión en la zona central de momento constante, así como fisuras por cortante en las zonas laterales. La evolución del patrón de fisuración (Figura 7) mostró una distribución uniforme de grietas de flexión con separaciones entre 15 y 25 cm, indicando una buena adherencia entre el acero de pretensado y el concreto, así como una adecuada transferencia de tensiones en la interfaz viga-losa. La apertura máxima de fisuras bajo la carga máxima de cada ciclo se mantuvo por debajo de 0,3 mm, cumpliendo con los límites de durabilidad establecidos para ambientes moderadamente agresivos según el ACI 224R-01. Este control de la fisuración es fundamental para preservar la integridad de las armaduras y prevenir la corrosión durante la vida útil de la estructura.

Al final del tercer ciclo, se observó una reducción en la rigidez global del modelo del orden del 15% respecto al primer ciclo, cuantificada mediante la pendiente de la curva momento-deformación en el rango elástico. Esta degradación de rigidez es consistente con los modelos de daño acumulado por fatiga en estructuras de concreto, donde la microfisuración progresiva reduce el módulo de elasticidad efectivo del material. Sin embargo, no se evidenció una pérdida significativa de capacidad resistente última, lo que confirma que el daño

inducido fue controlado y representativo del deterioro por servicio, sin comprometer la integridad del modelo para las fases posteriores de refuerzo.

Comportamiento del Sistema de Refuerzo (Ensayos 4-5)

Las primeras iteraciones del sistema de pretensado exterior (Ensayos 4 y 5) con una fuerza de 20 toneladas revelaron limitaciones importantes en el diseño de los anclajes. Durante la aplicación de la carga, se detectó una deformación excesiva en el anclaje pasivo, evidenciada por desplazamientos relativos entre la placa de anclaje y la superficie de concreto del orden de 3 a 5 mm. Esta deformación, atribuible a una concentración de tensiones localizada y a una posible insuficiencia en la rigidez del dispositivo de anclaje, provocó una pérdida de tensión en los tendones y comprometió la efectividad del sistema de refuerzo.

Este hallazgo experimental es consistente con las advertencias de la literatura especializada, que señala el diseño de los anclajes y desviadores como uno de los aspectos más críticos en sistemas de pretensado exterior. La PTI (2023) enfatiza que los anclajes deben ser capaces de transferir la totalidad de la fuerza de pretensado al concreto sin exceder las tensiones admisibles del material, y deben ser diseñados para acomodar las rotaciones y desplazamientos previstos sin desarrollar deformaciones plásticas. La respuesta adoptada en esta investigación, la detención del ensayo y la modificación del sistema de anclaje, demuestra la importancia de un proceso iterativo en el desarrollo de técnicas de refuerzo, donde la validación experimental permite identificar y corregir deficiencias que los modelos analíticos podrían no predecir adecuadamente.

Comportamiento del Modelo Reforzado (Ensayos 6-7)

Una vez implementadas las modificaciones en el sistema de anclaje y desviadores, y con una fuerza de pretensado incrementada a 28 toneladas, se procedió a los ensayos finales. Los resultados obtenidos superaron ampliamente las expectativas iniciales.

- **Ensayo 6:** La carga máxima aplicada alcanzó los 72,2 toneladas, correspondiente a un momento flector máximo de 48,7 ton·m. Este valor representa un incremento del 84% respecto al momento de rotura del modelo sin reforzar 26,5 ton·m, estimado a partir del Ensayo 0 considerando la contribución de la losa). El ensayo se detuvo en este nivel, no por falla del elemento, sino porque ya se había superado holgadamente el objetivo de incremento del 33% y porque las deformaciones observadas (flecha central superior a L/50, aproximadamente 112 mm) y la extensión de las fisuras de flexión, que casi alcanzaban la losa superior, sugerían que se estaba próximos a la capacidad última del sistema.
- **Ensayo 7:** En este ensayo, se decidió llevar el modelo hasta la rotura para determinar la capacidad última real del sistema reforzado. El momento máximo alcanzado

fue de 50,3 ton·m, lo que supone un incremento del 90% respecto al modelo sin reforzar. La rotura se inició por la aparición de una grieta longitudinal en el concreto a lo largo de uno de los tornillos de fijación de las planchas inferiores que soportan las guías de los cables (Figura 7). Esta grieta, indicativa de una falla local por tracción en el concreto debido a la concentración de tensiones alrededor del anclaje mecánico, provocó la detención del ensayo antes de alcanzar la falla por flexión pura. Simultáneamente, las grietas de flexión en la zona central alcanzaron la fibra superior de compresión, señal inequívoca de que el agotamiento de la sección era inminente.

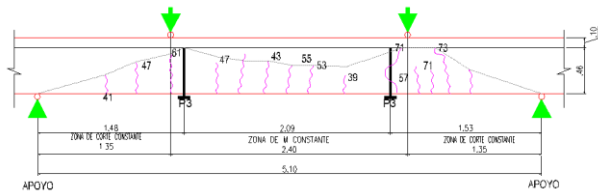


Figura 7. Esquema de agrietamiento del ensayo 7 (m).

Análisis de las Curvas Momento-Deformación

La Figura 8 presenta las curvas momento-deformación (flecha central) para los ensayos representativos. El análisis de estas curvas revela aspectos fundamentales del comportamiento estructural:

- **Incremento de Rigidez:** En los primeros estadios de carga, la curva del modelo reforzado (Ensayo 7) presenta una pendiente inicial ligeramente superior a la del modelo sin reforzar, indicando que el pretensado exterior contribuye a cerrar las fisuras existentes y a aumentar la rigidez elástica de la sección. Este efecto ha sido documentado por otros investigadores, quienes observan que el pretensado exterior restaura parcialmente la rigidez perdida por el agrietamiento.
- **Comportamiento Post-agrietamiento:** Una vez superado el momento de agrietamiento (aproximadamente 12 ton·m en el modelo reforzado), la pendiente de la curva se reduce, pero de manera menos pronunciada que en el modelo sin reforzar. Esto evidencia que el pretensado exterior controla efectivamente la apertura de fisuras y mantiene una rigidez post-agrietamiento superior, lo que se traduce en menores deformaciones para un mismo nivel de carga de servicio.
- **Ductilidad y Capacidad de Deformación:** A pesar del incremento significativo en la capacidad resistente, el modelo reforzado mantuvo una ductilidad aceptable, con una flecha última del orden de $L/40$ (140 mm) antes de la falla localizada en el anclaje. Esta combinación de alta resistencia y ductilidad moderada es característica de los sistemas de pretensado exterior bien diseñados, donde los tendones no adheridos permiten cierta deformación antes de la falla.

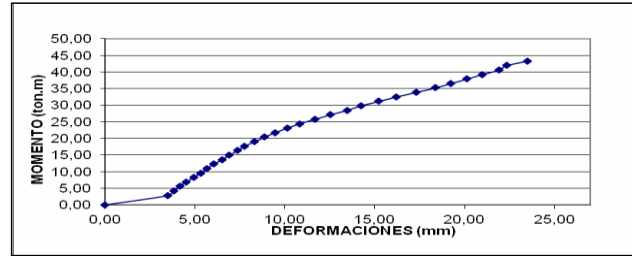


Figura 8. Grafico Momento-Deformación del ensayo 7.

Influencia del Pretensado en el Comportamiento a Cortante

Un aspecto adicional observado durante los ensayos fue la mejora significativa en el comportamiento a cortante del modelo reforzado. La aplicación del pretensado exterior genera un estado de compresión biaxial en el alma de las vigas, lo que retrasa la aparición de fisuras por cortante y modifica su inclinación. En el Ensayo 7, las fisuras por cortante en las zonas laterales aparecieron para niveles de carga superiores a los del modelo sin reforzar, y su inclinación respecto al eje longitudinal de la viga fue menor (aproximadamente 25° - 30° frente a los 35° - 45° observados en el Ensayo 3). Este fenómeno es coherente con los principios de la mecánica del concreto estructural, donde la componente vertical de la fuerza de pretensado (cuando los cables tienen trayectorias poligonales) y el estado de compresión longitudinal contribuyen a aumentar la resistencia a cortante del concreto.

Investigaciones recientes han cuantificado este efecto, demostrando que el pretensado exterior puede incrementar la capacidad a cortante entre un 20% y un 40%, dependiendo de la configuración de los tendones y la geometría de la sección. En el presente estudio, aunque no se midió directamente la capacidad a cortante última, la evidencia cualitativa del patrón de fisuración y la ausencia de fallas frágiles por cortante hasta momentos cercanos a la rotura sugieren que el incremento en la resistencia a cortante fue sustancial.

Limitaciones del Sistema de Refuerzo

A pesar de los excelentes resultados obtenidos, el estudio también reveló limitaciones importantes del sistema propuesto:

- **Concentración de Tensiones en Anclajes y Desviadores:** La falla final del Ensayo 7, iniciada por una grieta alrededor de un tornillo de fijación, evidencia que los puntos de conexión entre los elementos metálicos añadidos y el concreto existente constituyen las zonas más vulnerables del sistema. Este hallazgo subraya la necesidad de un diseño cuidadoso de estos detalles, con especial atención a la distribución de tensiones y a la posible interacción entre esfuerzos de tracción locales y el estado tensional global.
- **Fuerza de Pretensado Limitada por los Elementos Metálicos:** Es lógico pensar que incrementar la fuerza de pretensado por encima de las 28 toneladas empleadas podría haber generado ganancias aún mayores en

capacidad resistente. Sin embargo, como se demostró en los Ensayos 4 y 5, el límite superior de la fuerza aplicable está determinado por la capacidad de los anclajes y desviadores, no por la resistencia de la sección de concreto. Por tanto, optimizar el diseño de estos componentes es la clave para maximizar la efectividad del sistema.

- **Pérdidas de Pretensado a Largo Plazo:** El estudio experimental no abordó las pérdidas diferidas de pretensado (por fluencia, retracción y relajación) que ocurren a lo largo del tiempo. Investigaciones previas indican que estas pérdidas pueden ser significativas en sistemas de pretensado exterior, especialmente si los tendones son largos y están expuestos a variaciones ambientales. Sería necesario complementar este trabajo con estudios analíticos o monitorizaciones a largo plazo para cuantificar este efecto.

Comparación con la Literatura y Alcance de los Resultados

Los incrementos de capacidad del 84-90% obtenidos en esta investigación superan los rangos típicamente reportados en la literatura para sistemas de pretensado exterior, que suelen oscilar entre el 20% y el 50%. Esta diferencia puede atribuirse a varios factores: (a) la combinación sinérgica del pretensado exterior con el cerramiento metálico de la sección, que aumenta el brazo mecánico interno y confina el núcleo de concreto; (b) el estado de daño moderado del modelo antes del refuerzo, que permitió una movilización efectiva del sistema; y (c) la configuración específica de los desviadores, que optimiza la trayectoria de los tendones y maximiza la excentricidad.

Resultados comparables han sido reportados por investigaciones que combinan pretensado exterior con otros sistemas de refuerzo, como las láminas de fibra de carbono (FRP). Por ejemplo, estudios recientes han demostrado incrementos de hasta el 70% en vigas de concreto reforzadas con una combinación de pretensado exterior y FRP. La combinación propuesta en este trabajo, pretensado exterior más cerramiento metálico, ofrece la ventaja adicional de ser completamente desmontable e inspeccionable, lo que facilita el mantenimiento futuro y la eventual sustitución de componentes.

CONCLUSIONES

La presente investigación experimental evaluó la efectividad de una técnica combinada de reforzamiento para tableros de puentes de concreto, basada en la aplicación de pretensado exterior y la adición de elementos metálicos. A partir de los resultados obtenidos y su discusión, se derivan las siguientes conclusiones:

Hallazgos Principales

- **Efectividad del Sistema de Refuerzo:** La técnica propuesta demostró ser altamente efectiva para

incrementar la capacidad portante de tableros de puentes dañados. Los ensayos hasta la rotura evidenciaron un incremento en el momento resistente último del 84% (Ensayo 6) y del 90% (Ensayo 7) respecto al modelo sin reforzar. Este resultado supera ampliamente el objetivo inicial del 33% y se sitúa por encima de los incrementos típicamente reportados en la literatura para sistemas de pretensado exterior, que oscilan entre el 20% y el 50%. La combinación sinérgica del pretensado exterior con el cerramiento metálico de la sección explica, en gran medida, esta notable mejora.

- **Recuperación y Mejora de la Rigidez:** El pretensado exterior no solo incrementó la capacidad última, sino que también contribuyó a recuperar parcialmente la rigidez perdida durante el proceso de envejecimiento acelerado. En los primeros estadios de carga, la pendiente de la curva momento-deformación del modelo reforzado fue superior a la del modelo sin reforzar, indicando un cierre efectivo de las fisuras preexistentes. Este fenómeno es consistente con investigaciones previas que demuestran que el pretensado exterior restaura la rigidez elástica de elementos fisurados, mejorando su comportamiento en condiciones de servicio.
- **Mejora del Comportamiento a Cortante:** Se observó una mejora cualitativa significativa en la respuesta a cortante del modelo reforzado. La aparición de fisuras por cortante se retrasó y su inclinación respecto al eje longitudinal de la viga disminuyó, evidenciando el efecto benéfico del estado de compresión biaxial inducido por el pretensado. Este hallazgo es coherente con los principios de la mecánica del concreto estructural y con estudios recientes que cuantifican incrementos en la capacidad a cortante entre el 20% y el 40% en elementos pretensados exteriormente.
- **Importancia Crítica de Anclajes y Desviadores:** Los ensayos demostraron que el diseño de los anclajes y desviadores es el factor más crítico para el éxito del sistema de refuerzo. Las primeras iteraciones (Ensayos 4 y 5) fallaron por deformación excesiva de los anclajes, y la rotura final del Ensayo 7 se inició por una concentración de tensiones alrededor de un tornillo de fijación. Estos hallazgos confirman las advertencias de la literatura especializada, que señala estos componentes como los elementos más vulnerables en sistemas de pretensado exterior. La fuerza máxima de pretensado aplicable está limitada por la capacidad de estos dispositivos, no por la resistencia de la sección de concreto.
- **Comportamiento Dúctil del Sistema Reforzado:** A pesar del significativo incremento en la capacidad resistente, el modelo reforzado mantuvo un comportamiento dúctil aceptable, con deformaciones últimas del orden de $L/40$ antes de la falla localizada. Esta combinación de alta resistencia y ductilidad moderada es característica de los sistemas con tendones no adheridos, donde la deformación de los tendones puede acomodarse sin pérdida brusca de capacidad.
- **Independencia de la Historia de Carga:** Se confirmó

que la resistencia nominal última tras el reforzamiento es independiente del daño previo acumulado, siempre que no exista una degradación severa del concreto por corrosión o aplastamiento. Esto posiciona a la técnica como una solución robusta para puentes con historial de sobrecargas desconocidas

Contribuciones del Estudio

- **Validación Experimental de una Técnica Combinada:** Este trabajo proporciona evidencia experimental robusta sobre la efectividad de combinar pretensado exterior con elementos metálicos de cerramiento y rigidización. La técnica propuesta ofrece una solución viable para el reforzamiento de puentes existentes, con ventajas significativas en términos de rapidez de ejecución, mínima interferencia con el tráfico y capacidad de inspección y mantenimiento futuro.
- **Cuantificación del Incremento de Capacidad:** Se ha cuantificado, mediante ensayos controlados hasta la rotura, el incremento de capacidad alcanzable con esta técnica (84-90%), proporcionando a los ingenieros prácticos un rango de referencia para el diseño de intervenciones similares.
- **Identificación de Puntos Críticos de Diseño:** El estudio ha identificado y documentado experimentalmente los puntos críticos en el diseño del sistema (anclajes, desviadores, conexiones mecánicas), ofreciendo lecciones valiosas para optimizar futuras aplicaciones.

Limitaciones del Estudio

- **Condiciones de Laboratorio:** El estudio se realizó en condiciones controladas de laboratorio, con un modelo a escala real pero simplificado respecto a la complejidad de un puente real (continuidad, apoyos, cargas dinámicas, efectos térmicos, etc.). La extrapolación de estos resultados a estructuras reales debe realizarse con cautela.
- **Fuerza de Pretensado Limitada:** Como se mencionó, la fuerza de pretensado aplicada (28 toneladas) estuvo limitada por la capacidad de los anclajes y desviadores diseñados. Es posible que con un diseño optimizado de estos componentes se pudieran alcanzar fuerzas mayores y, consecuentemente, incrementos de capacidad aún superiores.
- **Pérdidas Diferidas no Evaluadas:** El estudio experimental no abordó las pérdidas de pretensado a largo plazo debidas a fluencia, retracción y relajación. Investigaciones previas indican que estas pérdidas pueden ser significativas en sistemas de pretensado exterior, especialmente en tendones largos y expuestos.
- **Comportamiento a Fatiga no Evaluado:** Aunque se aplicaron ciclos de carga para simular el envejecimiento, no se realizó un estudio específico de fatiga a largo plazo. El comportamiento bajo cargas repetitivas durante millones de ciclos, típico de puentes, no fue evaluado y merece atención en futuras investigaciones.

Recomendaciones para Investigaciones Futuras

- **Optimización del Diseño de Anclajes y Desviadores:** Se requiere investigación adicional enfocada específicamente en el diseño óptimo de anclajes y desviadores, incluyendo estudios paramétricos sobre geometría, detalles de conexión y distribución de tensiones. El uso de modelos de elementos finitos (MEF) calibrados con resultados experimentales podría ser una herramienta valiosa en este sentido.
- **Estudios de Comportamiento a Largo Plazo:** Sería recomendable realizar estudios de monitorización a largo plazo en prototipos instrumentados para cuantificar las pérdidas diferidas de pretensado y evaluar la evolución del comportamiento estructural bajo condiciones ambientales reales.

Conclusión Final

La investigación demuestra, de manera concluyente, que el reforzamiento de tableros de puentes de concreto mediante pretensado exterior combinado con elementos metálicos es una técnica viable, efectiva y eficiente. Los incrementos de capacidad del orden del 90% obtenidos experimentalmente avalan su aplicación en estructuras reales que requieran ser adaptadas a las exigencias de los modernos trenes de carga. El éxito de la técnica depende críticamente de un diseño cuidadoso de los anclajes y desviadores, así como de una correcta instrumentación y control durante el proceso de ejecución. Con las optimizaciones adecuadas y la consideración de las limitaciones identificadas, esta técnica puede convertirse en una herramienta estándar en el arsenal de los ingenieros estructurales dedicados a la rehabilitación y gestión de infraestructuras de puentes.

REFERENCIAS

- Abdulsahib, W. S., Ali, H. M., & Mahmoud, A. S. (2024). External prestressing technique for reinforced concrete member strengthening: A review study. AIP Conference Proceedings, *3009*(1), 030004.
- ACI Committee 224. (2001). *Control of cracking in concrete structures (ACI 224R-01)*. American Concrete Institute.
- ACI Committee 318. (2019). *Building code requirements for structural concrete (ACI 318-19) and commentary*. American Concrete Institute.
- ASTM International. (2021). *ASTM C39/C39M-21: Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens*. ASTM International.
- ASTM International. (2022). *ASTM C78/C78M-22: Standard test method for flexural strength of concrete (using simple beam with third-point loading)*. ASTM International.
- Chatelain, J., Godart, B., & Duchene, J. L. (1991). *La reparación de puentes de hormigón pretensado. Métodos y ejemplos*. En I Simposio Nacional sobre conservación, rehabilitación y gestión de Puentes. Madrid.
- COVENIN. (2006). *Norma Venezolana COVENIN 1753-2006: Proyecto y construcción de obras en concreto

- estructural*. Fondonorma.
- Petrangeli, M. P. (1996). *External prestressing for bridge repair: The italian experience*. En Recent Advances in Bridge Engineering. Barcelona.
- Post-Tensioning Institute. (2023). *PTI M50.1-23: Specifications for grouting of post-tensioned structures*. Post-Tensioning Institute.
- Radomski, W. (1996). *Application of external prestressing for strengthening of bridge structures in Poland*. En Recent advances in bridge engineering. Barcelona.
- Tilly, G. P. (2002). *Performance and management of post-tensioned structures*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures & Buildings, *152*(1), 3-12.