Refuerzo estructural: Concreto con fibra de ultra alto rendimiento

Adriano Reggia. Departamento de Ingeniería Civil, Arquitectura, Suelos, Medio Ambiente y Matemáticas. Universidad de Brescia, Italia | UNIBS.
Giovanni A. Plizzari. Departamento de Ingeniería Civil, Arquitectura, Suelos, Medio Ambiente y Matemáticas. Universidad de Brescia, Italia | UNIBS.

Fotos y figuras: Cortesía de Universidad de Brescia, Italia | UNIBS.

Foto 1. Vista general del ensayo

La creciente edad de la infraestructura de transporte de concreto reforzado, construida principalmente entre los años 60 y 70, se está convirtiendo rápidamente en un tema clave de discusión para el futuro desarrollo de las construcciones en muchos países[1]. La intervención en estas estructuras, particularmente la de los puentes en carreteras, puede significar el reemplazo completo o un reforzamiento de los elementos y en ambos casos la premisa es la necesidad de una ejecución veloz debido a los elevados costos de la interrupción del tráfico. Durante las últimas dos décadas, el Concreto Reforzado con Fibra (CRF) se ha presentado en el mercado como una solución útil para diferentes tipos de estructuras nuevas[1] o para la rehabilitación de las existentes, con excelentes resultados, ya que presenta una mayor resistencia residual posterior al agrietamiento. La experiencia en todo el mundo ha permitido que el CRF ingrese a códigos estructurales de diferentes países del mundo, así como en el Código Modelo fib de 2010[2].

En la Universidad de Brescia, en Italia, se adelantó un trabajo de investigación sobre la aplicación de Concreto Reforzado con Fibra de Alto Rendimiento (UHPFRC, por sus siglas en inglés) para el fortalecimiento de pilares de puentes, que pueden representar en muchos casos prácticos, una solución rentable frente al reemplazo total de la estructura. El objetivo de este artículo es presentar el estudio experimental que demuestra la posibilidad de mejorar la respuesta sísmica de estos elementos con el uso de una capa delgada de UHPFRC alrededor del elemento (es decir, un revestimiento). Adicionalmente, la aplicación de una nueva capa de UHPFRC permite renovar la capacidad de las estructuras para resistir la acción del entorno, mejorando su durabilidad. Por lo tanto, la intervención de reforzamiento, que aumenta tanto la capacidad de carga de la estructura como la reducción de la tasa de deterioro futuro del material puede prolongar la vida útil de los elementos.

1: American Society of Civil Engineers, "2013 Report card for America's infrastructure", American Society of Civil Engineers, 2013.
2: Fédération Internationale du Béton. "fib Model Code for Concrete Structures 2010", 2012 [Volume 1, 350 pages, ISBN 978-2-88394-105-2; Volume 2.

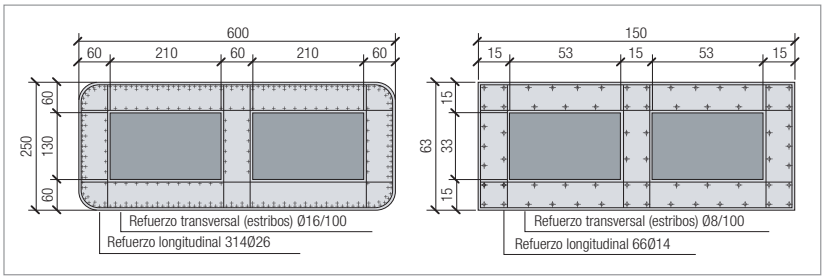

Figura 1. Sección transversal del en la base del pilar: escala real (izquierda) y escala reducida (derecha). (Dimensiones en mm).

El pilar del puente de concreto reforzado que se estudió experimentalmente fue escalado a 1:4 y reforzado mediante la aplicación de una capa de 30 mm de UHPFRC alrededor del elemento. El objetivo principal fue desarrollar una estrategia de refuerzo integral que pudiera ser adoptada por ingenieros de construcción y profesionales para aplicaciones en campo, mientras que como objetivo secundario, se incluyó la evaluación del rendimiento sísmico del elemento reforzado mediante la ejecución de una prueba de carga cíclica.

Investigación experimental

Diseño de la prueba a escala

El espécimen de ensayo representa el pilar de un puente que tiene un comportamiento de deformación en curvatura simple. Las dimensiones del elemento se basan en un pilar típico de puente de 23 m de altura que soporta tres vigas cajón simplemente apoyadas (Figura 1). La capa de revestimiento de UHPFRC se diseñó para mejorar el comportamiento estructural del pilar del puente, considerado de bajo rendimiento para las nuevas condiciones de diseño de acuerdo con los requerimientos sísmicos. La capa de UHPFRC, con un espesor de 30 mm, se instaló alrededor del elemento de ensayo de concreto reforzado con la ayuda de formaletas ligeras. El área de la sección transversal del refuerzo es 113.100 mm^2, representando el 20,92% del área de la sección transversal del elemento existente. Se instaló un refuerzo optimizado (OR) a la nueva capa UHPFRC para restaurar la capacidad a tensión del UHPFRC en la sección base. El OR, compuesto de 26 barras longitudinales de 12 mm de diámetro, espaciadas 100 mm entre ellas y recubiertas con una película de concreto de 10 mm de espesor, está diseñado para ceder cuando el UHPFRC alcanza su resistencia máxima a la tensión, proporcionando así ductilidad adicional a la sección. La relación de refuerzo, considerando tanto el elemento de concreto existente como la nueva capa de refuerzo, es igual a 2,10%, donde el OR se instala a lo largo de la zona crítica (1/3 de la altura del revestimiento) para finalmente ser anclado. Los principales parámetros de diseño se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Resumen de los parámetros principales de diseño del ensayo.
AUTOR

PARÁMETRO	SÍMBOLO	ESCALA REAL	ESCALA REDUCIDA
Escala		(1:1)	(1:4)
Área de concreto	A_C	9 385 960 mm^2	596 250 mm^2
Área de acero de refuerzo	A_S	164 588 mm^2	10 160 mm^2
Cuantía de acero de refuerzo	ρ_S	1,75%	1,70%
Espesor de UHPFRC	t_{UHPFRC}	120 mm	30 mm
Área de UHPFRC	A_{UHPFRC}	1 963 200 mm^2	113 100 mm^2
Área de refuerzo optimizada (OR)	A_{OR}	11 764 mm^2	2 941 mm^2
Cuantía de refuerzo optimizado (OR)	ρ_{OR}	0,40%	0,40%

Materiales

Se utilizó concreto de resistencia normal (NSC) hecho con cemento CEM II / A LL 32.5 R[3], con una relación agua/cemento de 0,45 con contenido de Super Plastificante (SP) para el pilar del puente. El tamaño máximo del agregado fue de 10 mm.

El UHPFRC utilizado era autocompactante y fue fabricado con cemento CEM I 52.5 R[4]con una relación agua/material cementante de 0,22, adicionado con puzolana, además del uso de aditivos Super Plastificantes (SP), Reductores de Contracción (SRA) y fibras corrugadas de acero inoxidable (Vf = 1%) de 19 mm de largo y 0,13 mm de diámetro. El tamaño máximo del agregado fue de 4 mm de manera que se adaptara al espesor crítico de 30 mm del revestimiento. Los detalles de la mezcla de NSC y UHPFRC se describen en la Tabla 2. Las principales propiedades mecánicas y físicas de las mezclas de NSC y UHPFRC se determinaron experimentalmente siguiendo la siguiente normativa europea:

- (EN 12390-3: 2009). Resistencia a la compresión en cubos.
- (EN 12390-6: 2010). Resistencia a la tracción indirecta.
- (EN 12390- 13: 2013). Módulo de elasticidad.
- (EN 14651: 2005). Tenacidad a la fractura.

MATERIAL	NSC	UHPFRC
Relación Agua/Material Cementante	0,45	0,22
Agregados	6,17	1,85
Adición Puzolánica	-	0,034
Contenido de Super Plastificante	0,035	0,030
Contenido de Reductor de Contracción	-	0,031
Fibras de acero	-	0,04
Tamaño máximo del agregado (mm)	10	4

Tabla 2: Composición de las mezclas de NSC y UHPFRC (relación en volumen frente al total de material cementante).
AUTOR

3: Norma EN 197-1 CEM II/ A LL 32.5 R: Cemento Portland con caliza, subtipo A, contenido entre 6 y 20% en masa de caliza, clase resistente 32.5 N/mm^2, alta resistencia inicial
4: Norma EN 197-1 CEM I 52.5 R: Cemento Portland, clase resistente 52.5 N/mm^2, alta resistencia inicial.
5: Fabricado según normas D.M. 14/01/2008 Y A 35080

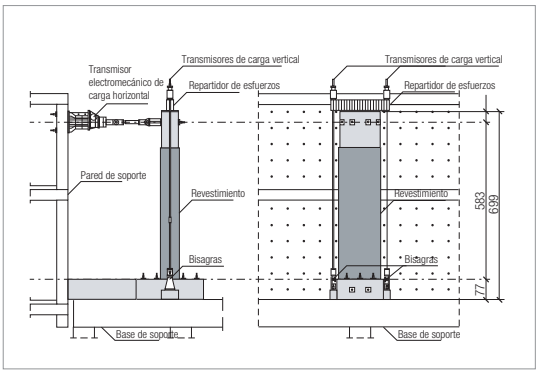

Figura 2. Montaje experimental de la prueba: vista lateral (izquierda), vista frontal (center), dimensiones en centímetros.

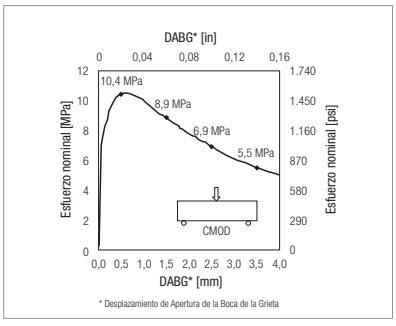

Figura 3. Curva de respuesta promedio del UHPFRC (3 especímenes) bajo flexión en tres puntos de acuerdo con EN 14651:2005.

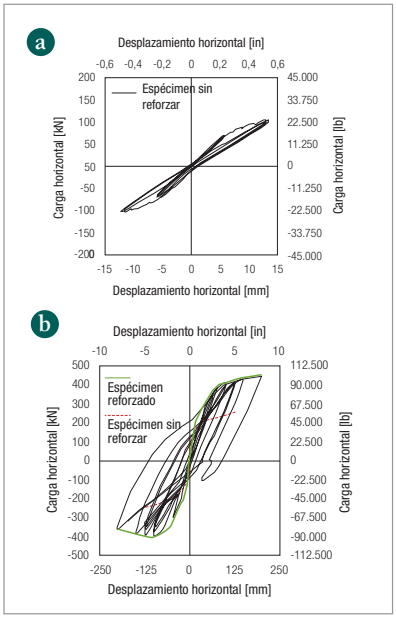

Figura 4. Carga horizontal vs. desplazamiento del espécimen de referencia (a) y espécimen reforzado con curva envolvente (b).

Tabla 3. Propiedades mecánicas y físicas principales del NSC y el UHPFRC.

	NSC			UHPFRC
Edad (días)	28	210 (Primera Prueba)	270 (Segunda Prueba)	28 (Tercera Prueba)
Resistencia a la compresión (MPa)	42,5	48,4	49,5	136,3
Resistencia a la tracción indirecta (MPa)	*	3,4	3,5	14,2
Módulo de elasticidad (MPa)	*	34 510	36 035	44 879

*Parámetros no medidos.

Las muestras de material fueron almacenadas en condiciones ambientales no controladas dentro del laboratorio de ensayos y cerca al pilar del puente. Se utilizó acero B450C[5] prensado en caliente para los refuerzos del pilar y para su adición en el revestimiento OR.

Espécimen

El espécimen de prueba se construyó en el "Laboratorio Pietro Pisa" de la Universidad de Brescia en dos etapas.

1. **Construcción de la muestra de ensayo.** El espécimen de prueba se vació horizontalmente sobre formaletas de madera, se curó durante 28 días y, finalmente, se ubicó verticalmente para ser probado. El levantamiento del elemento se realizó de manera que se garantizara que los esfuerzos de tensión generados por el movimiento fueran significativamente más bajos que la resistencia a tensión del material.
2. **Aplicación del reforzamiento.** Antes de colocar la capa de UHPFRC, la muestra se lavó con chorro de arena a presión con el objetivo de obtener una superficie muy rugosa (Rt≥ 3.0 mm), así mismo, el OR se conectó a la base de la muestra mediante el uso de anclajes químicos. El UHPFRC se preparó en el sitio con la ayuda de una mezcladora planetaria, para posteriormente ser vertido en cuatro etapas utilizando formaletas deslizantes ligeras, donde, además, a través de las juntas frías, se incorporó refuerzo adicional local. Después de retirar los encofrados, el revestimiento se curó durante 7 días humedeciendo la superficie y envolviéndolo con una lámina de plástico.

Montaje del ensayo

El pilar del puente fue probado bajo una carga estática, unidireccional y cíclica a lo largo del eje menor de inercia (ver Figura 2). Se utilizó un transmisor electromecánico de carga horizontal con una capacidad de 1500 kN conectado a la pared de soporte para aplicar la carga lateral. Para la simulación de la carga de gravedad, se aplicó una carga vertical constante V = 1000 kN a través de un repartidor de esfuerzos de acero cargado por dos gatos hidráulicos conectados a la base de soporte a través de dos varillas de acero con bisagras. La carga vertical se diseñó estableciendo la relación $V / f_c A_c = 0{,}05$ con $f_c = 35$ MPa ($f_c = 0{,}83 \cdot f_{c\ cubo}$[6]) como resistencia nominal a la compresión. Se usaron diez varillas de acero postensadas para evitar la rotación de la cimentación en la base de soporte, dos barras postensadas (a tensión) y dos vigas en concreto reforzado (a compresión) para evitar el deslizamiento de la cimentación desde la pared de soporte.

Ejecución de la prueba

El espécimen fue cargado cíclicamente en sentido "norte-sur" bajo un protocolo controlado por relación de deriva. La deriva (θ) se definió como la relación entre el desplazamiento lateral (d) en el punto de aplicación de la carga horizontal y la distancia entre el mismo punto y la base del elemento (H).

Se realizaron dos pruebas: la primera, antes de ejecutar el reforzamiento, se realizó bajo cargas de servicio hasta el primer craqueo del elemento no reforzado (es decir, el espécimen de referencia) con una desviación máxima del 0.2%. La segunda prueba, se ejecutó después de la aplicación del refuerzo bajo las cargas máximas de diseño y hasta el fallo del elemento, con una desviación máxima igual a 3.4%. La primera prueba se realizó para simular el daño acumu-

6: Valor de resistencia a la compresión de un cubo de concreto
7: Norme Tecniche, "Norme tecniche per le Costruzioni". Decreto Ministeriale, Official Gazette 29, 2008.
8: En la normativa europea, cuando un concreto se especifica como C25/30, el primer número hace referencia a la resistencia medida en cilindros como se hace en Colombia y el segundo número a la resistencia medida en cubos.

lado durante la vida útil del pilar del puente debido a los esfuerzos generados por viento, las fuerzas de inercia causadas por el movimiento de vehículos y actividades sísmicas inferiores al nivel de diseño. La segunda prueba se realizó con el fin evaluar el rendimiento sísmico del elemento después de su reforzamiento.

Resultados de la prueba y discusión

Propiedades del material

La Figura 3 y la Tabla 3 muestran los resultados de la prueba. La resistencia a la compresión del NSC se midió en el especímen no reforzado, después de 28 días, para determinar el tipo de resistencia, después de 210 días al iniciar la primera prueba y, después de 270 días, al inicio de la segunda prueba sobre el espécimen reforzado.

La resistencia a la compresión, antes de la corrección, de los cubos ensayados ($f_c$cubo) fue de 42,5 MPa, 48,4 MPa y 49,5 MPa respectivamente. Según el Eurocódigo 2 [7] el tipo de resistencia del NSC correspondía a C25/30 [8].

La resistencia a la compresión, la resistencia a la tracción indirecta y el módulo de elasticidad del UHPFRC se determinaron experimentalmente después de 28 días, al comienzo de la segunda prueba (espécimen reforzado). Se encontró una resistencia a la compresión (f_c, cubo) de 136,3 MPa. Según el Eurocódigo 2 [8], el tipo de resistencia del UHPFRC fue el más alto: C90/105. La resistencia a la tracción indirecta fue de 14,2 MPa y el módulo elástico de 44,879 MPa. El comportamiento posterior al agrietamiento se examinó mediante pruebas de flexión en tres puntos de vigas con muescas. Las resistencias residuales a la flexión significativas para SLS[9] (fR1) y para ULS[10] (fR3) fueron de 10,4 MPa y 6,9 MPa respectivamente. De acuerdo con el Código de modelo 2010 (MC2010)[2], la clase de resistencia posterior al agrietamiento fue 5a.

Respuesta sísmica

La Figura 4 muestra la respuesta sísmica de en elemento sin reforzar y del mismo elemento reforzado, respectivamente. El espécimen de referencia se probó hasta una deriva θ = 0,25%, alcanzando una resistencia máxima de 100 kN en ambas direcciones. La carga correspondiente al primer craqueo del elemento de referencia se estimó en 70 kN, donde se pudo observar una desviación del comportamiento elástico. La respuesta sísmica fue simétrica con una deformación residual limitada al retirar la carga. El espécimen reforzado alcanzó una carga máxima de 451 kN durante el ciclo con deriva máxima θ = 3,4%. Mientras que en una dirección la carga lateral continuó creciendo hasta el final de la prueba, en la otra dirección, la resistencia alcanzó un valor máximo de 407 kN durante el ciclo con deriva máxima θ = 1,7% seguido por una reducción (-12%) a 360 kN con una deriva máxima θ = 3,4%. Después de alcanzar la deriva máxima, se observó el pandeo del revestimiento en la base del elemento.

Discusión

La respuesta estructural de la muestra de referencia (no reforzada) no se determinó experimentalmente del todo ya que la prueba se llevó a cabo únicamente hasta la carga de servicio. Por lo tanto, la respuesta estructural completa se simuló mediante un análisis no lineal, basado en la teoría seccional, estimado por la integración de la curvatura causada por el momento de flexión en el elemento (considerado como un voladizo con carga en su extremo sin apoyar).

La respuesta en general del espécimen reforzado fue mayor. La Tabla 4 resume la mejora en el rendimiento con respecto a tres índices: la fuerza horizontal máxima (H), el desplazamiento máximo (d) y la deriva máxima (θ). En particular, la carga final aumentó hasta un + 74% con respecto a la predicción teórica y el desplazamiento hasta un + 57%. La carga que determina el primer craqueo y rendimiento de los refuerzos de acero aumentaron hasta + 42% y + 90% respectivamente, con respecto a la predicción teórica.

Resumen y conclusiones

Basados en el estudio experimental aquí presentado, se concluye que:

- El revestimiento de bajo espesor de UHPFRC se ejecutó con éxito alrededor de un pilar de puente en concreto reforzado existente. Esta estrategia de reforzamiento puede adoptarse, como se ha probado, para aplicaciones de campo, tanto de pequeña escala como de gran escala.
- El revestimiento de UHPFRC mejoró la respuesta sísmica en el ULS[10] del espécimen del pilar del puente en concreto reforzado. La carga final se incrementó notablemente con respecto al elemento no reforzado; por lo tanto, el revestimiento de UHPFRC se puede considerar en estudios posteriores como una posible técnica para la reducción de vulnerabilidad sísmica en pilares de puentes existentes.
- El revestimiento de UHPFRC mejoró también el comportamiento estructural en SLS[9] del espécimen del pilar del puente en concreto reforzado. Además, el revestimiento de UHPFRC controló el daño que se produce para una intensidad sísmica inferior al nivel de diseño con un patrón difuso de micro craqueo.
- La vida útil de un pilar de un puente existente puede extenderse más allá de su condición inicial de acuerdo con los rendimientos estructurales para los que se diseñó y a los requisitos de durabilidad prescritos que pueden lograrse con el uso de revestimientos con UHPFRC.

9: "Serviceability limit state". Estado límite de capacidad de servicio. Para satisfacer los criterios de estado límite de capacidad de servicio, una estructura debe permanecer funcional para su uso previsto sujeto a carga (leída: todos los días), y como tal, la estructura no debe causar incomodidad al ocupante en las condiciones de rutina.

10: "Ultimate limit state". Estado límite último. Para satisfacer el estado límite último, la estructura no debe colapsarse cuando se somete a la carga de diseño máxima para la cual fue diseñada.

noticreto LA REVISTA DE LA TÉCNICA Y LA CONSTRUCCIÓN