

Hampton Road Bridge-Tunnel. Prefabricados con pretensado resistente a la corrosión

Hampton Road Bridge-Tunnel: Precast concrete elements with corrosion-resistant pre-stressing strands

Antonio Vázquez Salgueiro^a, José Ballesta Díaz^b, Conchita Lucas Serrano^c,
Juan Jesús Álvarez Andrés^d, Susana López Manzano^e

^a Ingeniero de Caminos. DRAGADOS S.A. Jefe del Servicio de Procesos Constructivos y Trabajos Temporales. avazquez@dragados.com

^b Ingeniero de Caminos. FLATIRON-DRAGADOS. Design Manager. jballesta@dragados-usa.com

^c Ingeniera de Caminos. DRAGADOS S.A. Jefa Dpto Estructuras Obra Civil, Geotecnia y Obras Marítimas. clucass@dragados.com

^d Ingeniero de Caminos. DRAGADOS S.A. Jefe del Servicio de Puentes y Estructuras de Obra Civil. jjalvarez@dragados.com

^e Ingeniera de Caminos. DRAGADOS S.A. Servicio de Procesos Constructivos y Trabajos Temporales. slopezm@dragados.com

RESUMEN

El estado de Virginia (EE.UU.) está implantando, en algunos proyectos de renovación de puentes y viaductos ya obsoletos, la necesidad de emplear materiales resistentes a la corrosión para los cordones de pretensado. En la obra Hampton Roads Bridge-Tunnel Expansion Project (Norfolk, Virginia, EE.UU.) se han sustituido los 5,6 km de los viaductos de acceso a los túneles que cruzan la bahía por nuevos viaductos más anchos (doble número de carriles), en los que se han empleado cordones de pretensado de acero inoxidable y de CFRP (polímero reforzado con fibras de carbono) tanto en la fabricación de las vigas como en los pilotes prefabricados de hormigón pretensado (cuadrados y circulares huecos).

ABSTRACT

The state of Virginia (USA) is requiring, in some of their bridge renovation projects, the use of corrosion resistant materials for the prestressing tendons. In Hampton Roads Bridge-Tunnel Expansion Project (Norfolk, Virginia - USA) it was required to demolish and replace both viaducts to access the tunnels to cross the bay with new viaducts with double number of traffic lanes. In these new structures, stainless steel and CFRP (carbon fiber-reinforced polymer) have been used for the prestressing tendons used in the precast concrete beams and precast concrete piles (square and circular).

PALABRAS CLAVE: vigas, pilotes prefabricados, pretensado, acero inoxidable, CFRP.

KEYWORDS: concrete girders, precast concrete piles, prestressing, stainless steel, CFRP.

1. Descripción general de la obra

La obra Hampton Roads Bridge-Tunnel Expansion Project (Norfolk, Virginia, EE.UU.) consiste en la mejora y ampliación de la autopista Interstatal I-64 entre las ciudades de Norfolk y Hampton, siendo el cliente VDOT (Virginia

Department of Transportation). Esta obra incluye:

- Realización de dos nuevos túneles paralelos, con una longitud de 2406,8 m por túnel, que dupliquen la capacidad de tráfico de los dos

Sustitución de los viaductos de aproximación norte y sur a los túneles por nuevos viaductos con doble capacidad (4 carriles por sentido en vez de los 2 carriles de los viaductos existentes). Los nuevos viaductos tienen las siguientes características:

- Viaducto Norte: Está formado por 2 viaductos independientes, cada uno para un sentido de circulación. El viaducto del tráfico en el sentido este tiene una longitud de 891 m con 32

- Viaducto Sur: En la mayor parte de su longitud es un único viaducto que alberga los dos sentidos de circulación. Tiene una longitud total de 1943 m, con 59 vanos de luces entre 18,5 m y 37,8 m, teniendo juntas de dilatación a una distancia máxima de 187 m.



- Adecuación de las conexiones entre viaductos y túneles a la nueva disposición.
- Reparación y mejora de aproximadamente 11 km de carreteras y calles, incluyendo 9 puentes en esa zona.



Uno de los factores determinantes en la concepción de esta actuación por parte del cliente es la durabilidad de los viaductos sobre la bahía, como prueba el alto grado de deterioro de los existentes, al estar en zona de ambiente marino, condicionado por la exposición a la carrera de marea y las salpicaduras del oleaje en las pilas-pilote y cabeceros y la exposición a ciertas salpicaduras debido al viento y a la baja cota de la cara inferior en las vigas.

Al problema de durabilidad se une la necesidad de utilizar pretensado en varios de los elementos de hormigón prefabricado más expuestos de las estructuras: las pilas-pilote y las vigas doble T.

El pliego de proyecto marcaba los siguientes requerimientos para las estructuras marinas:

- Vida útil para el diseño de los viaductos y estructuras en ambiente marino: 100 años.
- Necesidad de usar armadura pasiva y cordones de pretensado resistentes a la corrosión.

Por tanto, los viaductos Norte y Sur de acceso a las islas de la bahía de Norfolk son, hoy en día, los mayores viaductos de Norteamérica (y muy posiblemente del mundo) con vigas pretensadas con tendones de CFRP.



Figura 3. Montaje de vigas en el viaducto Sur.

2. Diseño con elementos resistentes a la corrosión

El diseñador del proyecto de los viaductos y túneles fue Mott McDonald y el diseño de los elementos con CFRP siguió las especificaciones de ACI 440.1R (Ref. [3]).

El empleo de armadura y pretensado resistentes a la corrosión puede llevar asociado una relajación de los requisitos del hormigón en términos de impermeabilidad y compacidad, debido a que la penetración de cloruros, sulfatos y carbonatación inversa afectará en menor medida a este tipo de acero. De igual forma, permite utilizar recubrimientos de hormigón claramente inferiores, más propios de ambientes no corrosivos, lo que es una gran ventaja para la utilización de elementos prefabricados estándar.

Por esta misma razón, los requerimientos de fisuración también se pueden relajar. Como ejemplo cabe mencionar que las especificaciones de contrato para pilotes convencionales incluyen que el pilote no trabaje nunca a tracción, mientras que para pilotes con toda la armadura de acero inoxidable el Cliente aceptó, en casos específicos, la relajación de este requisito.

2.1 Tipos de cordones resistentes a la corrosión usados

Ya desde el principio de la ejecución de las obras se inició el proceso de análisis de las diferentes opciones, así como de la identificación de suministradores para los diferentes tipos posibles de cordones de pretensado resistente a la corrosión. El pliego del contrato contemplaba la posibilidad de dos tipos diferentes:

- Cordones de pretensar de acero inoxidable tipo 2205 dúplex (SCW2205).

- Cordones de polímero reforzado con fibras de carbono (CFRP), según las especificaciones de proyecto.

CFRP main strands - 7-wire:

Diameter of strand = 0.6 inch
Area of strand, A_{ps} = 0.179 sq. inch
Modulus of elasticity, E = 22,400 ksi
Min. ultimate tensile strength, f_{pu} = 337 ksi
Ultimate tensile strain at rupture = 1.3%

CFRP Spiral Ties - 7-wire:

Diameter of strand = 0.43 inch
Area of strand, A_{ps} = 0.09 sq. inch
Modulus of elasticity, E = 22,400 ksi

Main strand data:

LOCATION	SIZE	GRADE	NO. OF STRANDS	AREA (SQ. IN.)	ULTIMATE STRENGTH	PRESTRESS JACKING FORCE
Unit 1	0.6"	337 CFRP	22	0.179	60,300 lbs PER STRAND	42,200 lbs PER STRAND
Unit 2-5			24			
Unit 6-7			22			
Unit 1EB			22			

Figura 4. Especificación de los cordones de CFRP para pilotes en los planos de proyecto (plano 304-77 hoja 66 de 135).

La elección de uno u otro tipo de material podía tener repercusiones en:

- El suministrador del prefabricado: los posibles suministradores del prefabricado tenían experiencia con uno u otro tipo de cordones de pretensado, pero ninguno con los dos. Esto no solo tenía incidencia económica, sino que también podía afectar al plazo de entrega.
- De forma paralela, debido a la gran cantidad de elementos prefabricados, se valoró la posibilidad de montar una factoría de prefabricación en la propia obra. Los elementos de tesado y manejo de cada tipo de torón (acero o CFRP) no eran compatibles entre sí.
- El dimensionamiento de las vigas, en concreto el número de cordones de cada viga. La fuerza de tesado por torón y las pérdidas de relajación y fluencia son diferentes para cada material. Por tanto, hubo que decidir el tipo de cordón a emplear antes de redactar el proyecto final.
- La compatibilidad de “contacto” con la armadura pasiva de acero al carbono (fuera de la zona de alto potencial de corrosión) era

distinta en ambos materiales. Mientras la armadura de CFRP sí podía estar en contacto con armadura pasiva normal, éste no era el caso para la armadura de acero inoxidable, que debía estar aislada de la armadura de acero al carbono ante la posibilidad de creación de pares galvánicos entre el acero al carbono y el acero inoxidable.

Todas estas repercusiones se fueron clarificando y concretando a lo largo de la fase de proyecto.

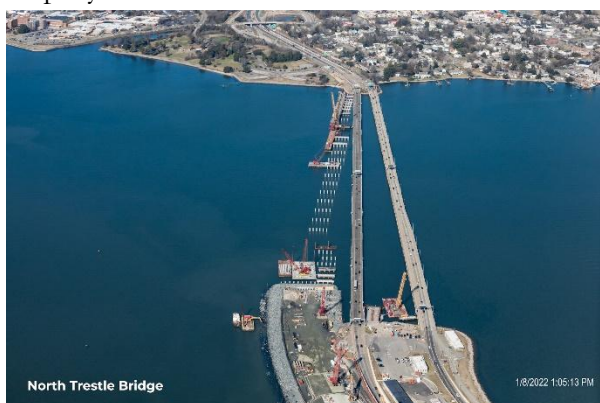


Figura 5. Vista aérea montaje del viaducto Norte

Siendo importante el factor económico de suministro de las unidades de prefabricado, resultaron más críticos los plazos y volúmenes de suministro, así como la flexibilidad de fabricación y suministro. El resultado del análisis se decantó, por tanto, hacia un sistema mixto de diseño y suministro, con un prefabricador externo que realizaba elementos con pretensado de CFRP (vigas para los Viaductos Norte y Sur y pilotes cilíndricos) y con una factoría montada y gestionada por la obra donde se realizaban elementos prefabricados con pretensado de acero inoxidable y acero al carbono (vigas para el resto de los puentes y pilotes cuadrados para los viaductos Norte y Sur).

2.2 Tipos de armadura pasiva empleada resistente a la corrosión

Para cumplir con los requerimientos del contrato se definieron 3 tipos de armadura pasiva metálica resistente a la corrosión:

- Clase I: Armadura según AASHTO M 334M/M 334-17, que puede ser tipo 1035

CS (acero con aleación de Cromo), con un mínimo contenido de Cromo de 9,2% (también conocida como MMFX tipo CS) o de acero inoxidable austenítico UNS S24100.

- Clase II: Armadura según AASHTO M 334M/M 334-17 de acero tipo Duplex UNS S32101.
- Clase III: Armadura según AASHTO M 334M/M 334-17 de uno de los siguientes tipos UNS S24000, S30400, S31603, S31653, S31803 ó S32304.

La armadura Clase III podía sustituirse por barras de CFRP.

3. Tipos de elementos prefabricados con pretensado resistente a la corrosión

Los elementos prefabricados en los que se usaron cordones de pretensar resistentes a la corrosión fueron: pilotes cuadrados, pilotes circulares huecos y vigas doble T (tipo PCBulb-T). Aunque en otros elementos también se usó armadura resistente a la corrosión, como es el caso de los cabeceros y la losa de hormigón de los viaductos, en ninguno de ellos se usaron cables de pretensado.

3.1 Pilotes cuadrados

Parte de los pilotes cuadrados con armadura resistente a la corrosión se fabricaron en la factoría de la obra con cordones de pretensado de acero inoxidable y espirales formadas por alambre de acero inoxidable. La otra parte lo suministró un prefabricador externo, con cordones de pretensado de CFRP y espiral de cercos de CFRP. Se emplearon en las siguientes estructuras:

- En la expansión de la isla Sur de conexión con los túneles, detrás del estribo del viaducto Sur. En esta era una zona compleja, donde la rasante de la

carretera bajaba por debajo del nivel del mar y era necesario hacer un cajón en U cimentado sobre pilotes cuadrados de 30"x30".

- En los estribos del North Trestle se emplearon pilotes cuadrados de 24"x24".

3.1.1. Expansión de la isla Sur (muros en U).

Se emplearon 376 pilotes de 30"x30" (762x762 mm) con una longitud total de 11.435 m.

Podían ir con armado de acero inoxidable o de CFRP:

- Acero Inoxidable, fabricados en la factoría de obra: el pretensado lo formaban 28 cordones de Ø0,5" de acero inoxidable tesados a 155,9 kN (65% de la resistencia última, 241,6 kN)
- CFRP de prefabricador externo: el pretensado lo formaban 24 cordones de Ø0,6" tesados a 187,9 kN (70% de la resistencia última, 268,5 kN).

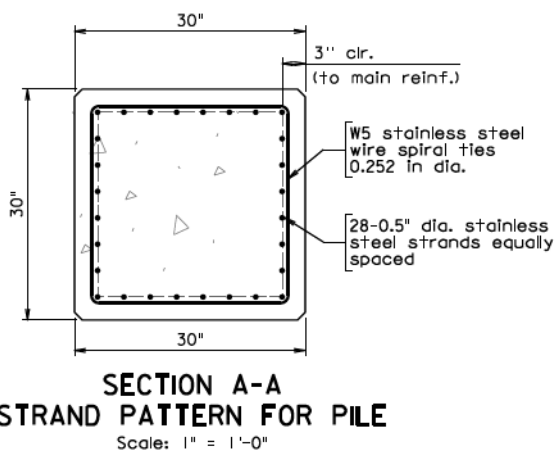


Figura 6. Sección del pilote cuadrado 30"x30" con cordones Ø0,5" de acero inoxidable.

3.1.2. Estribos del North y South Trestle

Se emplearon 186 pilotes de 24"x24" (610x610 mm) con una longitud total de 1.720 m. Suministrados por Coastal Precast Systems.

El pretensado de todos ellos fue de CFRP, formado por 14 cordones de Ø0,6" tesados a 187,9 kN (70% de la resistencia última, 268,5 kN).

3.2 Pilotes cilíndricos huecos

Los pilotes cilíndricos huecos con cordones de pretensado resistente a la corrosión se emplearon en los viaductos Norte y Sur. Son pilotes de $\text{Ø}_{\text{ext}} = 54"$ (1,37 m) y espesor = $6\frac{3}{4}"$ (171,5 mm), con 22 o 24 cordones Ø0,6" de CFRP, tesados a 187,9 kN (70% de la resistencia última, 268,5 kN). La hélice de armadura pasiva también era de CFRP.

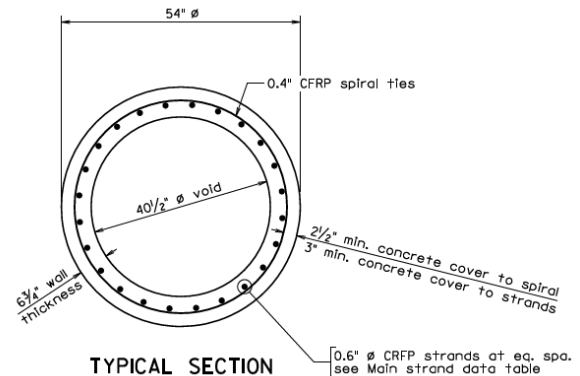


Figura 7. Sección del pilote cilíndrico hueco de Ø54" con cordones Ø0,6" de CFRP.

El total de pilotes empleado fue de 990 unidades, con una longitud total de 29.902 m. Todos ellos fueron suministrados por Coastal Precast Systems.

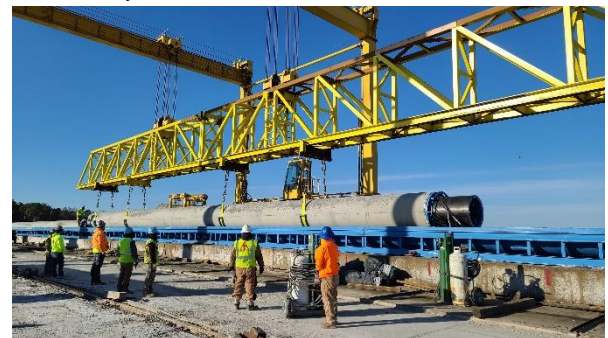


Figura 8. Pilote cilíndrico saliendo del molde.

Otro aspecto a resaltar de estos pilotes es su gran longitud: hasta 40,6 m, con un peso máximo de 66 t por pilote. Desde el punto de vista del transporte, del manejo y del hincado esta longitud de pilotes fue uno de los retos de esta obra.

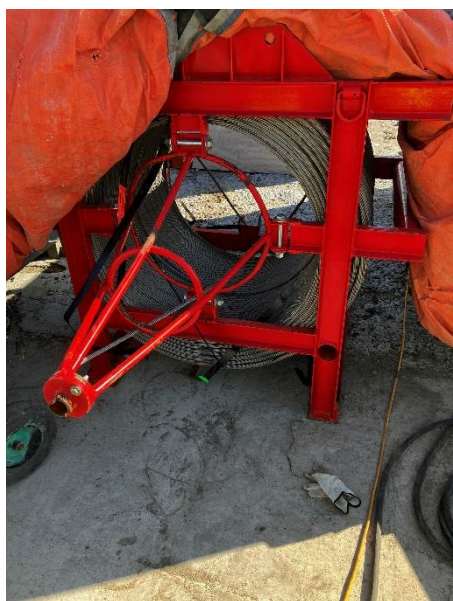


Figura 9. Bobina de cable de acero inoxidable (factoría de obra).

El acero inoxidable se emplea tanto para el acero activo como para la armadura pasiva, pudiéndose poner en contacto ambos sin riesgo de inducir una corrosión galvánica entre ambos que se produciría cuando dos metales diferentes se ponen en contacto.

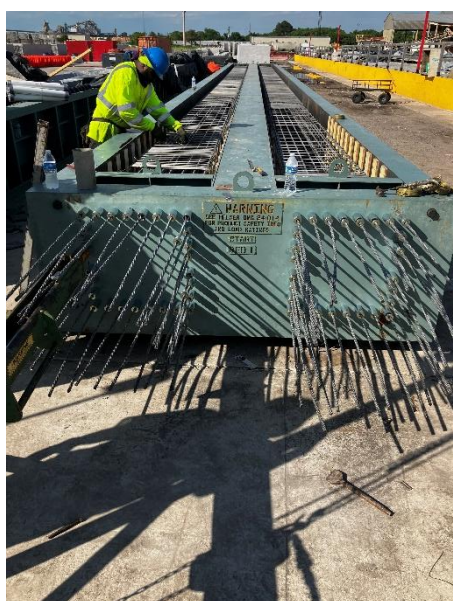


Figura 10. Bancada de fabricación de pilotes cuadrados (factoría de obra).

4.2 Fabricación de vigas con tendones de CFRP

Según se ha comentado, hasta la fecha de tomar la decisión sobre qué material se iba a utilizar

para el pretensado resistente a la corrosión de las vigas, solo se pudo identificar 9 puentes entre EEUU y Canadá, la mayor parte de ellos experimentales, que se habían construido con vigas o pilotes prefabricados con tendones de CFRP. En Virginia, el único puente del que se tenía referencia es un puente de 2 vanos de 25,6 m de luz que trabajaba como continuo para la sobrecarga de tráfico, con un total de 8 vigas tipo Bulb-T de 45" (1,14 m) de canto (ver ref. [2]), abierto al tráfico en 2015.



Figura 11. Elementos de la preparación del extremo de los cordones (cuñas, malla para anclaje, bloque de anclaje), de referencia [2].

En la referencia [2], también se indican claramente las peculiaridades del empleo de cordones de CFRP en la prefabricación:

- La zona de anclaje del cordón necesita una preparación especial y unas cuñas mucho más largas que las de los cordones de acero al carbono. Por tanto, para la puesta en carga de los tendones, se empalmaban los cordones de CFRP a cordones de acero de pretensado convencionales (con acopladores especiales) y se tesaba desde el cordón convencional y era éste el que se anclaba a la bancada.
- El almacenamiento, manejo, empalme y puesta en tensión de los cordones de CFRP son operaciones delicadas que necesitan procedimientos específicos para este material.

Estos dos aspectos fueron una preocupación desde el primer momento, ya que está claro que las condiciones de fabricación de 8 vigas de 25,6 m de luz para un proyecto “experimental” podían ser diferentes (normalmente mucho más cuidadas) que las condiciones de fabricación para un proyecto con casi 1500 vigas, de 3 tipos distintos, sujeto a las condiciones normales de presión de plazos y cambios en los planes de suministro. Por ello, se hizo un especial énfasis en el plan de calidad para la fabricación de estas vigas.



Figura 12. Vista de acopladores entre cordones de CFRP y cordones normales, de referencia [2].

Las especificaciones requerían el empleo de hormigón autocompactante para la fabricación de los pilotes con pretensado de CFRP. Aunque no existía una especificación de contrato con este requerimiento para las vigas, pareció razonable usar este tipo de hormigón también en las vigas, para evitar el empleo de vibradores en el hormigonado que, debido a la gran “sensibilidad” de los cordones de pretensado de CFRP, podían llegar a producir roturas de estos cordones durante el hormigonado.

Al final, la fabricación y suministro de estas vigas no han estado exentos de retos ni de problemas, pero pensamos que no se pueden achacar directamente a este tipo de pretensado y que, por tanto, se pueden considerar como “normales” para una obra con un volumen de suministro tan elevado.

Agradecimientos

Los autores quieren agradecer al equipo de la factoría de prefabricación en obra la ayuda proporcionada en la redacción de este artículo, en especial a su director Luis Miguel Sánchez Bustos.

Referencias

- [1] A. Vázquez, J. Simón-Talero, C. Lucas, H. Bernardo, *Hampton Road Bridge-Tunnel: muelle provisional desmontable para descarga de piezas de pontona*, IX Congreso de la Asociación Española de Ingeniería Estructural (ACHE), Granada 2025.
- [2] H. Celik Ozyildirim, S. R. Sharp, *Concrete Beams Prestressed Using Carbon Fiber Reinforced Polymer*, Virginia Transportation Research Council, report FHWA/VTTC 19-R29, Junio 2019.
- [3] ACI 440.1R Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforce with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars.