

# Estructuras del Segmento S3 del proyecto de ampliación de la autopista I-66

*Structures of Segment S3 of the I-66 widening project.*

José M. Simón-Talero Muñoz<sup>a</sup>, Francisco José Ponce Cordero<sup>b</sup>, Alejandro Hernández Gayo<sup>c</sup>, Javier Gamino Palomo<sup>d</sup>, Raquel Frontela Melero<sup>e</sup>, María Vega Laguna Díaz<sup>f</sup>, Ángel Carriazo Lara<sup>g</sup>

<sup>a</sup> Doctor ingeniero de caminos, canales y puertos. TORROJA Ingeniería, SLP. Consejero Delegado. [jsimontalero@torroja.es](mailto:jsimontalero@torroja.es)

<sup>b c d e g</sup> Ingeniero/a de caminos, canales y puertos. TORROJA Ingeniería, SLP. Ingeniero/a de Proyectos [fponce@torroja.es](mailto:fponce@torroja.es), [correo@torroja.es](mailto:correo@torroja.es), [jgamino@torroja.es](mailto:jgamino@torroja.es), [rfrontela@torroja.es](mailto:rfrontela@torroja.es), [correo@torroja.es](mailto:correo@torroja.es), [acarriazo@torroja.es](mailto:acarriazo@torroja.es)

## RESUMEN

El proyecto constructivo de la I-66 ha englobado la ampliación de un tramo 36.2 kilómetros de dicha carretera a su paso por el estado de Virginia del Norte, desde el Beltway capital (I-495) hasta Gainesville (Ruta 29). Dicho tramo se dividió en tres segmentos. El alcance de los trabajos desarrollados en la ampliación del segmento S3 de la I-66 incluyeron el proyecto de construcción, ampliación y rehabilitación de 17 estructuras, entre los que se incluyen puentes de vigas pretensadas de hormigón y puentes mixtos de vigas metálicas de gran curvatura, 9 pasos inferiores y una gran superficie de muros perimetrales a la autopista, contabilizando un área total de estructuras de aproximadamente 90000 m<sup>2</sup> y un coste aproximado de 370 M de USD.

## ABSTRACT

The I-66 construction project entailed the widening of a 36.2 kilometer stretch of the I-66 highway through Northern Virginia, extending from the Capital Beltway (I-495) to Gainesville (Route 29). This section was divided into three segments. The scope of work for the widening of segment S3 included the design, expansion and rehabilitation of 17 structures. These structures comprised prestressed concrete beam bridges, steel girder bridges with high curvature steel beams, 9 underpasses and extensive perimeter walls along the highway. The total surface area of structures was approximately 90000 m<sup>2</sup>, with an estimated cost of 370 million USD.

**PALABRAS CLAVE:** vigas pretensadas, puentes mixtos, pasos inferiores, muro y curvatura.

**KEYWORDS:** prestressed beams, steel girder bridge, underpasses, retaining walls and curvature.

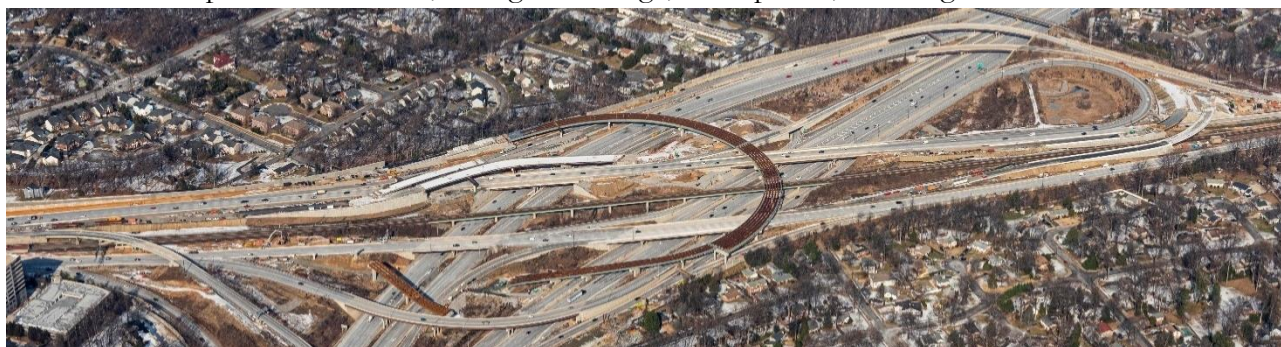
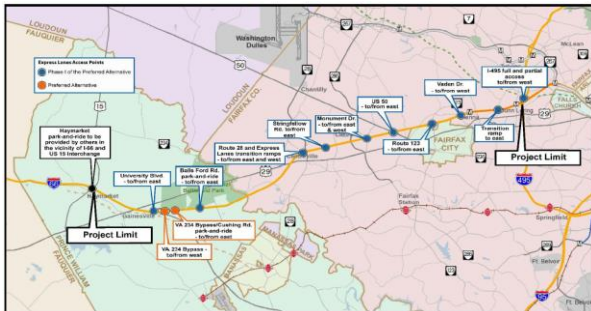


Figura 1. Vista general de las obras de ampliación de la I-66 en el cruce con la I-495.

## 1. Descripción del proyecto

El proyecto constructivo de la I-66, ubicado en el estado de Virginia del Norte (EEUU), ha consistido en la ampliación de la capacidad viaria de un tramo de 36.20 kilómetros de dicha autopista comprendido entre el Beltway capital (I-495) y Gainesville (Ruta 29).



**Figura 2. Trazado de la autopista I-66 desde la I-495 a la ruta 29 (Gainesville)**

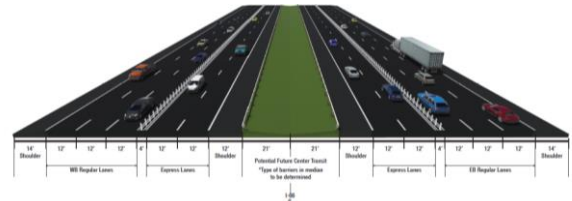
Dicho tramo de la I-66 fue dividido en los siguientes segmentos:

- Segmento S1: Comprendido entre la Sta. 5230+00, en el cruce de la I-66 con la Ruta 29 (Gainesville) y la Sta. 5820+00.
- Segmento S2: Comprendido entre la Sta. 5820+00 y la Sta. 6070+00, en el cruce de la I-66 con la ruta 28.
- Segmento S3: Comprendido entre Sta. 6070+00 y el Beltway capital (I-495) en la Sta. 6410+00 aproximadamente.

La ampliación de la I-66 es un proyecto con iniciativa de colaboración público-privada, cuyo diseño y construcción fue adjudicado a la Joint Venture FAM Construction, una empresa conjunta entre Ferrovial Construcción y Allan Myers. Torroja Ingeniería fue contratada por FAM para realizar la redacción de los proyectos de construcción de los puentes y muros del segmento S3 descrito anteriormente.

Las obras realizadas en la I-66 han permitido aliviar la congestión de los accesos a Washington D.C., mejorando la seguridad y reduciendo los tiempos de trayecto. En la sección final de la autopista se han incluido tres carriles de

circulación de uso general sin peaje y dos carriles rápidos en cada sentido, con un sistema electrónico de peaje abierto de última generación.



**Figura 3. Sección final de tronco de la autopista I-66**

El alcance de los trabajos desarrollados en la ampliación de la I-66 ha incluido el proyecto de construcción de 12 estructuras, entre los que se incluyen puentes de vigas pretensadas de hormigón y puentes mixtos de vigas metálicas de gran curvatura, 9 pasos inferiores, 4 ampliaciones de puentes existentes, 1 rehabilitación de un puente y una gran superficie de muros perimetrales a la autopista y a las estructuras proyectadas, contabilizando un área total de estructuras de aproximadamente 90000 m<sup>2</sup>, incluyendo puentes y muros, con un coste aproximado de 370 M de USD.

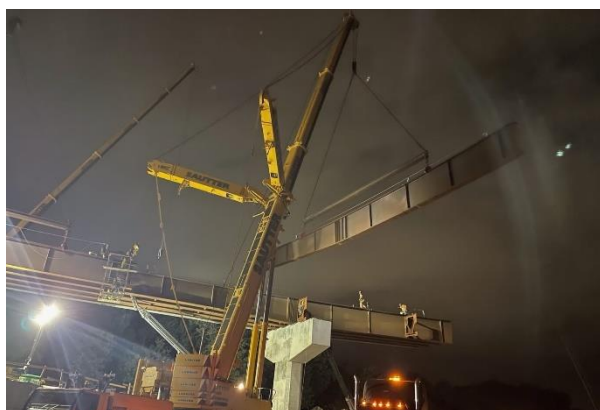


**Figura 4. Vista general de la construcción de las estructuras de la I-66 en el cruce con la I-495**

## 2. Condicionantes del proyecto

El condicionante principal en el diseño de las diferentes soluciones estructurales fue la necesidad de mantener en funcionamiento, durante la ampliación de la autopista, todos los

servicios existentes, sin que, ni las carreteras, ni la línea ferroviaria existente (WMATA), fueran cortadas en su totalidad durante el transcurso de los trabajos. Sólo fueron permitidos cortes parciales y temporales de las carreteras para los trabajos de construcción. Este condicionante obligó a realizar un detallado análisis del proceso constructivo de todas las estructuras previo a la construcción de estas. Dichos procesos constructivos incluían, en su mayoría, cortes parciales y desvíos de tráfico y frecuentes trabajos nocturnos con franjas horarias muy estrictas.



**Figura 5. Colocación de las vigas del puente B683**

Los procesos constructivos de las estructuras requirieron una coordinación muy importante y constante entre las diferentes disciplinas que englobaban el proyecto (equipo de trazado, desvíos de tráfico, construcción y diseño) con el fin de minimizar al máximo las afecciones al tráfico rodado y ferroviario, pero sin penalizar el rendimiento en la construcción y el coste de las estructuras. En el caso particular de los puentes mixtos, este condicionante tuvo gran incidencia en la ubicación de las uniones atornilladas entre las vigas, ya que, para reducir el número de cortes o desvíos de tráfico, estas uniones no siempre se ubicaron en los puntos estructuralmente óptimos.

Además, tal y como se ha comentado en el apartado anterior, todas las estructuras del tronco de la I-66 debían disponer de tres carriles de circulación de uso general sin peaje y dos carriles rápidos en cada sentido. Este condicionante, que obligaba a ensanchar el

tronco de la autopista existente, al incluir un total de seis nuevos carriles, llevó al diseño de una gran superficie de muros paralelos a la I-66 en gran parte del segmento S3, debido a la cercanía de las zonas residenciales y comerciales a la carretera, lo cual impedía la realización de desmontes y terraplenes.

Por último, como principales condicionantes técnicos para el diseño de las estructuras, fue necesario seguir lo establecido en las siguientes normativas o documentos técnicos:

- *AASHTO LRFD Bridge Design Specification, 7<sup>th</sup> Edition (2014)* y las modificaciones de VDOT (*Virginia Department of Transportation*) a la AASHTO.
- *Virginia Department of Transportation Road and Bridge Specifications and Standards (2016)* incluyendo la Revision I (16 de Febrero, 2017).

### 3. Estructuras proyectadas

Las actuaciones realizadas en la ampliación del segmento S3 de la autopista I-66 fueron desde la construcción de puentes, pasos inferiores y muros, hasta la ampliación, demolición y rehabilitación de estructuras existentes.

A continuación, se describen las principales características de las estructuras proyectadas por Torroja Ingeniería durante la realización del proyecto.

#### 3.1 Puentes

Se proyectaron un total de 14 puentes, de los cuales 10 fueron puentes mixtos de vigas metálicas y 4 fueron puentes de vigas pretensadas de hormigón. En el diseño de los puentes mixtos se utilizaron vigas metálicas de acero ASTM A709 Grade 50 ( $f_y = 350$  MPa) separadas un máximo de 12 ft (3.65 m). Generalmente, las vigas estaban conectadas entre sí mediante marcos transversales metálicos

en forma de K separados un máximo de 25 ft (7.62 m). La losa dispuesta sobre las vigas era de hormigón armado Class A4 ( $f_{ck} = 28.1$  MPa) y espesor constante de 8.5 in (21.6 cm).

En la tabla siguiente se muestran las dimensiones principales de los puentes mixtos.

**Tabla 1. Características de los puentes de mixtos de vigas metálicas diseñados por Torroja**

| Nombre        | Nº Vanos | Longitud [m] | Ancho [m] | Luz max. [m] |
|---------------|----------|--------------|-----------|--------------|
| B619          | 3        | 127.5        | 28.7      | 50.5         |
| B678          | 3        | 156.8        | 9.9       | 61.0         |
| B679          | 4        | 199.6        | 12.6      | 52.6         |
| B683 (Unit 1) | 4        | 207.9        | Var.      | 68.4         |
| B683 (Unit 2) | 5        | 267.2        | Var.      | 75.6         |
| B684          | 1        | 48.0         | 10.8      | 48.0         |
| B624          | 2        | 86.3         | 11.4      | 47.3         |
| B628          | 3        | 112.5        | 10.8      | 47.7         |
| B629 (Unit 1) | 4        | 139.0        | 11.1      | 42.7         |
| B629 (Unit 2) | 2        | 100.1        | 11.1      | 50.9         |

Se construyó una superficie total de 21455 m<sup>2</sup> de puentes mixtos de vigas metálicas.



**Figura 6. Vista general de la construcción de los puentes B628 y B679.**

A continuación, se muestra las cuantías y medición de acero obtenidas en el diseño los puentes mixtos.

**Tabla 2. Cuantía de acero de los puentes de mixtos diseñados por Torroja**

| Nombre                | Área tablero [m <sup>2</sup> ] | Peso Acero [T] | Cuantía [kg/m <sup>2</sup> ] | Radio curv. [m] |
|-----------------------|--------------------------------|----------------|------------------------------|-----------------|
| B619                  | 3660.7                         | 688.7          | 188.1                        | -               |
| B678*                 | 1552.9                         | 667.3          | 429.7                        | 135.9           |
| B679 (*)              | 2524.5                         | 688.7          | 272.8                        | 101.8           |
| B683 (Unit 1)         | 4328.1                         | 1000.8         | 231.2                        | 147.5           |
| B683 (Unit 2) (*)     | 4006.8                         | 1220.2         | 304.5                        | 147.5           |
| B684                  | 519.1                          | 177.9          | 342.7                        | 76.2            |
| B624                  | 986.0                          | 216.8          | 219.9                        | 106.68          |
| B628 (*)              | 1217.3                         | 320.5          | 263.3                        | -               |
| B629 (Unit 1 + 2) (*) | 2659.9                         | 617.7          |                              | 105.2           |

De los valores mostrados en la tabla anterior se desprenden las siguientes conclusiones:

- La cuantía de acero obtenida para puentes mixtos continuos, rectos o con curvatura moderada (radio de curvatura superior a 100.0 m), vigas metálicas separadas entre 9.0 ft (2.75 m) y 12.0 ft (3.65 m) y luces máximas comprendidas entre 40.0 m y 61.0 m oscila entre 185.0 kg/m<sup>2</sup> y 220.0 kg/m<sup>2</sup>.
- La cuantía de acero obtenida para puentes mixtos continuos, rectos o con curvatura moderada (radio de curvatura superior a 100.0 m), vigas metálicas separadas entre 9.0 ft (2.75 m) y 12.0 ft (3.65 m) y luces máximas comprendidas entre 61.0 m y 76.0 m oscila entre 220.0 kg/m<sup>2</sup> y 305.0 kg/m<sup>2</sup>.
- La cuantía de acero obtenida para puentes mixtos isostáticos de gran curvatura (radio de curvatura inferior a 100.0 m), esviados en apoyos, vigas metálicas separadas 10.0 ft (3.0 m) y luces máximas comprendidas entre 45.0 m y 50.0 m oscila entre 320.0 kg/m<sup>2</sup> y 365.0 kg/m<sup>2</sup>.

Nota: En los puentes en los que aparece un (\*), una o varias de sus pilas estaban formadas por un pórtico integral metálico. El peso del acero de estos pórticos está incluido en la medición de acero total que aparece en la tabla, por lo que la cuantía real del tablero de vigas metálicas está distorsionada respecto de los valores indicados en las conclusiones anteriores.

En los puentes de vigas prefabricadas se utilizaron vigas tipo BULT-T de hormigón Class A5 ( $f_{ck} = 35.1$  MPa) separadas un máximo de 12.0 ft (3.65 m). Al igual que en los puentes mixtos, la losa dispuesta sobre las vigas era de hormigón armado Class A4 ( $f_{ck} = 28.1$  MPa) y espesor constante de 8.5 in (21.6 cm). Las vigas pretensadas fueron conectadas entre sí mediante marcos transversales metálicos en forma de X separados un máximo de 30.0 ft (9.11 m) y rotulados en los extremos, donde conectan con las almas de las vigas.

El acero activo utilizado en las vigas fue del tipo ASTM A416 Grade 270 ( $f_u = 1896$  MPa). Los cables de pretensar tienen un diámetro de 0.6 in (15.24 mm) y un área nominal de 0.217 in<sup>2</sup> (140.0 mm<sup>2</sup>). La tensión de tesado inicial de los cables en todas las vigas fue de  $0.75f_u$  (1417MPa).

En la tabla siguiente se muestran las dimensiones principales de los puentes de vigas pretensadas de hormigón.

**Tabla 3. Características de los puentes de vigas pretensadas de hormigón diseñados por Torroja**

| Nombre | Nº Vanos | Longitud [m] | Ancho [m] | Luz max. [m] |
|--------|----------|--------------|-----------|--------------|
| B617   | 3        | 129.6        | 46.7      | 45.1         |
| B625   | 1        | 37.8         | Var.      | 37.8         |
| B670   | 3        | 79.2         | Var.      | 27.4         |
| B671   | 3        | 89.9         | Var.      | 32.0         |



**Figura 7. Colocación de las vigas del puente B617.**

Se construyó una superficie total de 7958 m<sup>2</sup> de puentes de vigas BULT-T pretensadas de hormigón.

### 3.2 Pasos inferiores

Se proyectaron un total de 9 pasos inferiores. Todos ellos eran marcos de hormigón armado Class A4 ( $f_{ck} = 28.1$  MPa) con un espesor de solera y forjado superior de 12.0 in (30.48 cm) y con un espesor en los hastiales de 10.0 in (25.48 cm).

En la tabla siguiente se muestran las dimensiones principales de los pasos inferiores.

**Tabla 4. Características de los pasos inferiores diseñados por Torroja**

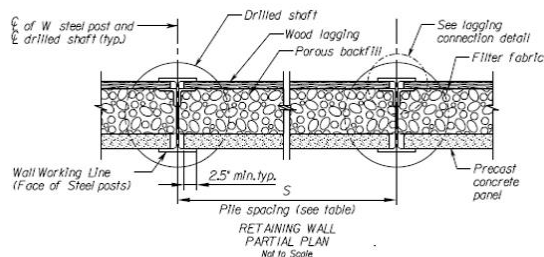
| Nombre | Espesor máx. Tierras [m] | Longitud [m] | Ancho libre [m] | Gálibo vertical [m] |
|--------|--------------------------|--------------|-----------------|---------------------|
| B651   | 1.2                      | 26.9         | 4.3             | 3.4                 |
| B652   | 1.9                      | 18.6         | 4.3             | 3.4                 |
| B653   | 1.7                      | 18.4         | 4.3             | 3.4                 |
| B654   | 3.4                      | 38.2         | 4.3             | 3.4                 |
| B655   | 2.1                      | 26.1         | 4.3             | 3.4                 |
| B656   | 1.5                      | 15.7         | 4.3             | 3.4                 |
| B657   | 1.2                      | 25.4         | 4.3             | 3.4                 |
| B658   | 1.5                      | 41.7         | 4.3             | 3.4                 |
| B659   | 1.4                      | 28.0         | 4.3             | 3.4                 |

Se construyó una superficie total de 1141 m<sup>2</sup> de pasos inferiores de hormigón.

### 3.3 Muros

La ampliación de la autopista I-66, pasando de dos carriles de uso general en cada sentido, a tres carriles de uso general sin peaje y dos carriles rápidos en cada sentido obligó a la construcción de muros de contención de tierras a ambos lados de la autopista en gran parte del segmento S3, ya que las zonas destinadas a uso residencial y comercial estaban muy próximas a la carretera, lo que hacía inviable la realización desmontes o terraplenes en los bordes de la calzada.

Estos muros, sensiblemente paralelos a la I-66, se denominan “*Soldier pile wall*” y están formados por perfiles metálicos tipo W que se unen a pilotes de hormigón previamente hincados en el terreno. La separación máxima entre los perfiles metálicos fue de 7.5 ft (2.29 m). Entre los perfiles metálicos se introducían una placa prefabricada de hormigón armado, situada en la cara exterior del muro, y una placa de madera, situada en la cara interior del mismo. El hueco libre que quedaba entre las placas de madera y hormigón prefabricado se rellenaba con un material poroso.



**Figura 8. Sección transversal de un muro tipo “soldier pile wall”**

El empuje del terreno, situado en el trasdós del muro, era transmitido por las placas de madera a los perfiles metálicos, y estos a su vez, a los pilotes de hormigón hincados en el terreno.

Cuando en el trasdós de los muros existía una zona residencial, se disponían barreras fonoabsorbentes ancladas a la coronación del muro para minimizar impacto acústico que generaba el tráfico rodado de la autopista.



**Figura 9. Vista general de muros tipo “Soldier pile wall” con barreras fonoabsorbentes**

En la mayoría de los casos, la colocación de estas barreras sobre los muros hacía que la altura de estos fuera bastante grande, por lo que había que tener muy en cuenta la acción del viento en el dimensionamiento de los muros, ya que la superficie expuesta al empuje del viento era muy grande y, por tanto, los esfuerzos que debía soportar tanto los perfiles metálicos, como los pilotes eran bastante altos.

Cuando la altura de los muros era muy elevada y, por tanto, los esfuerzos transmitidos por el terreno del trasdós del muro eran muy grandes, se disponían anclajes al terreno unidos a los perfiles metálicos para reducir estos esfuerzos en la cimentación.

En la tabla siguiente se muestran las dimensiones principales de los muros tipo “Soldier pile wall”.

**Tabla 5. Características de los muros tipo “Soldier pile wall” diseñados por Torroja**

| Nombre         | Longitud [m] | Altura [m] | Área [m <sup>2</sup> ] |
|----------------|--------------|------------|------------------------|
| RW-3A-EB-01    | 61.0         | 4.0        | 243.9                  |
| RW-3A-WB-01    | 57.9         | 2.9        | 167.6                  |
| RW-3C-495GWHS  | 420.6        | 3.2        | 1329.1                 |
| RW-3C-495HEGSI | 243.8        | 5.1        | 1233.5                 |
| RW-3C-495GNHW2 | 279.8        | 5.4        | 1514.0                 |
| RW-3C-495GNHW1 | 74.1         | 4.0        | 292.1                  |
| RW-3C-495GWHS1 | 86.3         | 2.8        | 242.1                  |
| RW-3C-495GNGW  | 203.6        | 5.8        | 1184.4                 |
| RW-3C-495GSHW1 | 353.0        | 5.9        | 2080.4                 |
| RW-3C-495HSHW2 | 407.5        | 5.7        | 2337.0                 |
| RW-3C-495GNGW1 | 264.3        | 8.5        | 2257.0                 |
| RW-3C-495GNGW2 | 75.6         | 12.0       | 911.4                  |
| RW-3C-495GNGW3 | 228.0        | 6.5        | 1473.2                 |
| RW-3C-495HEGN1 | 180.4        | 3.0        | 550.1                  |
| RW-3A-EB-04    | 182.9        | 6.6        | 1196.8                 |
| RW-3A-EB-05    | 129.8        | 4.7        | 606.2                  |
| RW-3A-WB-05    | 181.7        | 5.6        | 1014.0                 |
| RW-3A-EB-06    | 103.9        | 4.1        | 427.4                  |
| RW-3B-EB-03    | 248.4        | 2.7        | 676.5                  |
| RW-3B-WB-03    | 374.0        | 4.9        | 1848.2                 |
| RW-3B-EB-06A   | 111.6        | 2.0        | 227.7                  |
| RW-3B-EB-08    | 291.7        | 4.1        | 1201.5                 |
| RW-3B-WB-12    | 359.7        | 5.5        | 1998.2                 |
| RW-3C-66GEHE   | 288.0        | 4.0        | 1147.4                 |
| RW-3C-EB-04    | 578.5        | 6.3        | 3643.8                 |
| RW-3C-EB-05    | 347.8        | 5.2        | 1791.0                 |
| RW-3C-WB-05    | 381.3        | 4.1        | 1582.6                 |
| RW-3C-WB-07    | 141.3        | 2.3        | 395.3                  |
| RW-3C-WB-08    | 146.9        | 2.6        | 377.7                  |
| RW-3C-WB-09    | 67.7         | 2.7        | 180.0                  |
| RW-3A-123GHE   | 415.7        | 4.9        | 2036.3                 |
| RW-3A-123GHW   | 447.1        | 4.2        | 1874.4                 |
| RW-3A-123HEG   | 463.3        | 4.9        | 2291.0                 |
| RW-3A-123HWG   | 448.4        | 5.1        | 2299.4                 |
| RW-3B-VDRGHW   | 397.8        | 5.0        | 1991.7                 |
| RW-3B-VDRHEG   | 343.8        | 4.8        | 1655.3                 |
| RW-3A-WB-11    | 171.6        | 2.7        | 465.6                  |
| RW-3B-WB-01    | 149.7        | 3.3        | 491.5                  |
| RW-3C-EB-10    | 203.0        | 1.6        | 324.6                  |



**Figura 10. Vista general de la construcción de los muros paralelos a la I-66 (WB).**

Además de los muros anteriormente mencionados, se construyeron gran cantidad de muros en prolongación de los puentes para evitar los terraplenes, ya que, la distancia entre estructuras, carreteras y la línea ferroviaria (WMATA) era muy reducida. Estos muros eran, mayoritariamente, muros de suelo reforzado, compuestos por escamas de hormigón y flejes metálicos enterrados en el macizo de tierra.



**Figura 11.** Vista general de la construcción de los muros de los puentes B624 y B625 junto a WMATA.

En algunos de estos muros, ya sea porque tenían una altura considerable o porque se encontraban muy próximos a las vías ferroviarias (WMATA) fue necesario realizar, durante su construcción, un control de los asentamientos producidos en el terreno y en las vías ferroviarias a causa del peso de los rellenos.

En los casos concretos de los rellenos de los muros de los estribos de los puentes B624 y B628 se utilizó un relleno de hormigón ligero de densidad comprendida entre  $16.0 \text{ kN/m}^3$  y  $17.6 \text{ kN/m}^3$  (inferior a la densidad del terreno natural) para reducir los asentamientos del terreno en esas zonas.

A continuación, se muestran las dimensiones principales de los muros de suelo reforzado.

**Tabla 6.** Características de los muros de suelo reforzado diseñados por Torroja

| Nombre                           | Longitud [m] | Altura [m] | Área [m <sup>2</sup> ] |
|----------------------------------|--------------|------------|------------------------|
| RW-3C-WB-13 (B624 and B684)      | 70.7         | 5.4        | 383.4                  |
| RW-3C-495GWS2 (330B South Abut)  | 70.7         | 4.0        | 280.2                  |
| RW-3C-495HEGS3 (330B North Abut) | 105.8        | 3.9        | 410.3                  |
| RW-3C-495HNGW (B681 Abut)        | 64.9         | 4.9        | 321.4                  |
| RW-3C-495HSHW-1 (B679 Abut)      | 53.6         | 8.2        | 440.3                  |
| RW-3A-WB-02A (Chain North Abut)  | 65.5         | 6.1        | 399.5                  |
| RW-3A-EB-02B (Chain South Abut)  | 76.5         | 5.2        | 400.9                  |
| RW-3C-WB-10 (Gallows North abut) | 71.9         | 6.1        | 438.5                  |
| RW-3B-EB-06 (Nutley South Abut)  | 54.9         | 5.7        | 312.9                  |
| RW-3B-WB-06 (Nutley North Abut)  | 70.1         | 3.0        | 209.5                  |
| RW-3C-495-SB-1 (B622 Abut)       | 30.5         | 7.0        | 213.5                  |
| RW-3C-495-SB-2 (B622 Abut)       | 32.9         | 6.4        | 210.9                  |
| RW-3C-495-NB-1 (B665 Abut)       | 36.3         | 5.9        | 214.3                  |
| RW-3C-495HSGW-1 (B672 Abut)      | 15.5         | 5.2        | 80.7                   |
| RW-3C-495HSGW-2 (B672 Abut)      | 17.7         | 4.9        | 87.1                   |

Se construyó una superficie total de muros de  $51963 \text{ m}^2$ .

### 3.4 Ampliaciones

Se diseñó un total de 4 ampliaciones de puentes existentes. Todas las estructuras ampliadas eran puentes mixtos de vigas metálicas.

Las ampliaciones de las estructuras siempre se realizaron manteniendo la tipología estructural original y, manteniendo en todo momento el tráfico rodado sobre los puentes.

En la tabla siguiente se muestran las dimensiones principales de las ampliaciones realizadas en las estructuras existentes.

**Tabla 7.** Características de las ampliaciones de puentes existentes diseñados por Torroja

| Nombre        | Nº Vanos | Longitud [m] | Ancho [m] | Luz max. [m] |
|---------------|----------|--------------|-----------|--------------|
| B622          | 2        | 84.5         | Var.      | 42.7         |
| B665          | 3        | 127.2        | Var.      | 53.4         |
| B672          | 1        | 23.2         | Var.      | 23.2         |
| B629 (Unit 3) | 2        | 118.0        | Var.      | 60.0         |

Las ampliaciones de los puentes B622, B665 y B672, se realizaron siguiendo la misma metodología:

- Demolición del voladizo del tablero, sin dañar la armadura pasiva del mismo.
- Colocación de las vigas de la ampliación y conexión a la viga de borde existente mediante marcos transversales.

- Hormigonado de la losa del tablero correspondiente a la zona de ampliación.

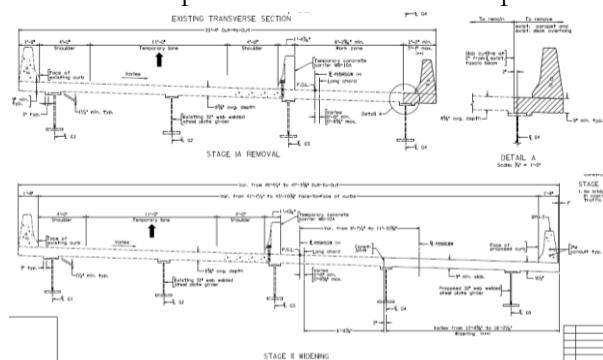


Figura 12. Fases constructivas para la ampliación del puente B672.

Especial dificultad tuvo la ampliación de la estructura B629 (Unit 3), ya que, antes de la misma hubo que eliminar la viga de borde del tablero y los marcos transversales conectados a ella, así como demoler la correspondiente losa forjado. Posteriormente, se añadieron las 5 vigas de la ampliación, se conectaron a las vigas existentes y se hormigonó la losa forjado correspondiente a la ampliación.

Al tener que mantener el tráfico rodado sobre la estructura durante las operaciones de demolición y ampliación, hubo que hacer un control muy detallado de los esfuerzos en las vigas y en los marcos transversales durante todas las fases constructivas. Se comprobó que, si se mantenía el tráfico rodado a lo largo de toda la sección del tablero, en algunas fases constructivas, los esfuerzos generados en los diferentes elementos estructurales eran superiores a la resistencia de estos. Para evitar el colapso del puente, se realizaron exhaustivos estudios, barajando diferentes fases constructivas y reducciones parciales de tráfico hasta encontrar la solución estructural óptima que permitiera la ampliación del puente de una manera segura.



Figura 13. Vista general del B629 (Unit 3) antes de la ampliación.



Figura 14. Vista general del B629 (Unit 3) una vez realizada la ampliación.

Se ha ampliado una superficie total de puentes de 2374 m<sup>2</sup>.

### 3.5 Demoliciones

En la tabla siguiente se muestran las características principales de los puentes demolidos durante la ampliación de la I-66.

Tabla 8. Características de los puentes demolidos por Torroja

| Nombre        | Nº Vanos | Longitud [m] | Ancho [m] | Luz max. [m] |
|---------------|----------|--------------|-----------|--------------|
| B619          | 5        | 119.9        | 19.8      | 30.5         |
| B629 (Unit 3) | 2        | 122.6        | 4.0       | 61.6         |

La demolición del puente B619 se realizó de forma simultánea a la construcción del nuevo puente, puesto que era muy importante que los cortes de tráfico sobre esta estructura fueran del menor tiempo posible. Este condicionante complicó enormemente la construcción del puente, ya que, la nueva estructura ocupaba parcialmente la sombra del puente existente, por lo que hubo que realizar varias fases constructivas, donde se alternaban demoliciones y construcciones parciales de ambas estructuras. Aunque este método constructivo complicó y ralentizó la construcción del nuevo puente, permitió cumplir con el condicionante, anteriormente citado, acordado con la administración.

Se demolió una superficie total de estructuras de 2866 m<sup>2</sup>.

### 3.5 Rehabilitaciones

A continuación, se muestra las dimensiones principales del puente B677, rehabilitado durante la ampliación de la I-66.

**Tabla 9. Características del puente existente rehabilitado por Torroja**

| Nombre | Nº Vanos | Longitud [m] | Ancho [m] | Luz max. [m] |
|--------|----------|--------------|-----------|--------------|
| B677   | 3        | 101.3        | 38.1      | 42.2         |

Para dar cabida a los nuevos servicios requeridos en el proyecto de ampliación de la autopista I-66 fue necesario modificar la disposición transversal de carriles y aceras dispuestos en el puente existente B677 y adaptarlos a la nueva configuración. Esto obligó a realizar las siguientes actuaciones sobre la plataforma de la estructura existente:

- Demolición de barreras, aceras y mediana existente.
- Fresado de la superficie total del tablero
- Sustitución de juntas transversales
- Sustitución de apoyos de vigas para adaptarlos a las cargas de la nueva normativa.
- Construcción de nuevas aceras, barreras y mediana.

Además de las actuaciones descritas en la superestructura, al ampliar la autopista I-66, que discurre bajo la estructura B677, fue necesario reforzar los muros de los estribos del puente mediante anclajes al terreno para que pudiera soportar el empuje producido por las tierras del trasdós de estos, ya que, con la citada ampliación de la autopista se eliminaba el terreno ubicado delante de los estribos y que ayudaba a soportar dicho empuje.

Se rehabilitó una superficie total de puente de 3859 m<sup>2</sup>.

## 4. Tipologías estructurales

En el apartado anterior se han descrito las diferentes actuaciones estructurales realizadas en la ampliación de la I-66, así como, las diferentes

tipologías estructurales relativas a los tableros de los puentes y a los muros.

A continuación, se describen las principales tipologías estructurales utilizadas en los estribos y pilas de las estructuras diseñadas.

### 4.1 Estribos

Los estribos diseñados en el proyecto de ampliación de la I-66 se engloban en tres tipologías: Estribos integrales, semi-integrales y convencionales.

En los estribos integrales y semi-integrales no se requerían juntas de dilatación en los estribos y, en ambos, el empuje del terreno era soportado por el tablero mediante un diafragma de hormigón que une las vigas. En los estribos semi-integrales las vigas descansaban sobre apoyos elastoméricos, mientras que en los estribos integrales, el tablero estaba unido al estribo.

La elección de uno de ellos dependía de varios factores: tipología de puente, longitud total de la estructura y esviaje en ejes de apoyos.

En la figura siguiente, perteneciente al *Virginia Department of Transportation. Road and Bridge Specification*, se indican los valores que determinan la elección de un estribo u otro.

|                            | FULL INTEGRAL STRAIGHT                        | SEMI-INTEGRAL STRAIGHT    | CONVENTIONAL CANTILEVER ABUTMENT WITH DECK SLAB EXT. |                           |
|----------------------------|-----------------------------------------------|---------------------------|------------------------------------------------------|---------------------------|
|                            |                                               |                           | STRAIGHT                                             | CURVED                    |
| Steel bridges              | 300 feet for 0° skew<br>150 feet for 30° skew | 450 feet<br>30° max. skew | 450 feet<br>45° max. skew                            | 300 feet<br>30° max. skew |
| Concrete bridges           | 500 feet for 0° skew<br>250 feet for 30° skew | 750 feet<br>30° max. skew | 750 feet<br>45° max. skew                            | n/a                       |
| Total movement at abutment | 1 1/2"                                        | 2 1/4"                    | 2 1/4"                                               | 1 1/2"                    |

**Figura 15. Tabla para la selección de los estribos.**

Por las características de los puentes diseñados en el proyecto, la mayoría de los estribos seleccionados fueron convencionales. En estos estribos se dispusieron anclajes al terreno para reducir las cargas transmitidas a la cimentación, debido al empuje de tierras.

La cimentación de casi todos los estribos se realizó mediante pilotes metálicos de perfil tipo H, a excepción de los ubicados en zonas cercanas a WMATA, donde la cimentación se ha resuelto mediante pilotes convencionales de

hormigón, con el fin de reducir las vibraciones en las vías ferroviarias.

## 4.2 Pilas

Las pilas diseñadas en el proyecto de ampliación de la I-66 fueron muy variadas. Dependiendo de la tipología de tablero, de la ubicación de la pila, de la anchura del tablero, de la altura de la pila, de los servicios o carreteras que pasasen bajo el puente... se utilizó una de las siguientes tipologías: Pilas martillo, columnas circulares, cargaderos multifuste o pórticos integrales metálicos.

Las pilas martillos se utilizaron, habitualmente, en las zonas donde el espacio era reducido. La mayoría de los puentes ubicados en el nudo donde se cruza la I-66 con la I-495 utilizaron este tipo de pilas.



Figura 16. Vista general de la pila martillo del B624.

Cuando bajo el puente a proyectar discurría una carretera que era necesario salvar se disponían pórticos integrales metálicos apoyados sobre columnas circulares.



Figura 17. Vista general de la construcción de los pórticos metálicos del B678.

Por su parte, las pilas multifuste se utilizaron cuando estas eran sensiblemente paralelas a la carretera que se deseaba salvar. Esta tipología de pilas fue utilizada en los puentes que cruzaban la I-66 de forma sensiblemente ortogonal y estaban ubicado fuera del nudo donde se cruza la I-66 con la I-495.



Figura 18. Vista general de la pila multifuste del puente B617.

La cimentación de casi todas las pilas se resolvió con pilotes metálicos de perfil tipo H, a excepción de las pilas ubicadas en zonas cercanas a WMATA, donde la cimentación se resolvió mediante pilotes convencionales de hormigón, con el fin de reducir las vibraciones en las vías ferroviarias.

## Agradecimientos

Nos gustaría dar las gracias a todo el equipo de Ferroviario destinado en Virginia, por la ayuda y colaboración constante a lo largo de todo el proyecto, en especial a Juan Boticario y Rafael Salinas.

Por último, agradecer a todos los compañeros de American Structurepoint el trabajo realizado y la ayuda prestada a lo largo de esta gran aventura, en especial a nuestro estimado Wing Lau.

## Referencias

- [1] "LRFD Bridge Design Specifications, 7<sup>th</sup> Edition (2014), AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials)"
- [2] "Virginia Department of Transportation. Road and Bridge Specification and Standards (2016); including revision I (February 16, 2017)"