

# Diseño orientado a la durabilidad y el mantenimiento en puentes de carretera. La experiencia del proyecto de puentes en el estado de Virginia (USA).

*Design oriented to durability and maintenance in roadway bridges. Experience in the design of bridges in the state of Virginia (USA).*

José Manuel MARTÍNEZ GARCÍA<sup>a,\*</sup>, Andrea CASTRO HERNÁNDEZ<sup>b</sup>,  
Arquímedes BASCÓN RAMÍREZ<sup>b</sup>, Iván CAMPO RUMOROSO<sup>b</sup>, Javier SÁNCHEZ  
HARO<sup>c</sup>, Óscar Ramón RAMOS GUTIÉRREZ<sup>d</sup>

<sup>a</sup>Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. WSP Spain

<sup>b</sup>Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. WSP Spain

<sup>c</sup>Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

<sup>d</sup>Dr. Ingeniero de Caminos. Universidad de Cantabria.

## RESUMEN

La forma de diseñar y construir puentes en Estados Unidos difiere en muchos aspectos a la habitual con las administraciones españolas, con manuales de obligada aplicación que limitan la libertad de diseño y que dirigen a la adopción de detalles y soluciones estructurales sancionados por la práctica, la mayoría de ellos muy interesantes desde el punto de vista de la durabilidad y el mantenimiento de la estructura. Entre ellos, los que minimizan el uso de juntas de calzada, los relativos al drenaje de los tableros, y los dirigidos a asegurar la seguridad de los operarios de mantenimiento posteriormente. La estandarización además conduce a la minimización de errores constructivos por parte de las empresas constructoras locales.

## ABSTRACT

The way bridges are designed and constructed in the United States differs in many ways to the common practice in Spain with the different administrations, with manuals of mandatory application that limit the freedom of design, requiring the use of specific details and structural solutions. Most of them are very interesting from the durability and maintenance points of view. Among them, some minimize the use of expansion joints, others optimize the drainage of the decks, and some try to guarantee the safety of technicians during the maintenance operations. Additionally, standardization tends to minimize construction errors for local construction companies.

**PALABRAS CLAVE:** puentes, Estados Unidos, durabilidad, mantenimiento, estandarización

**KEYWORDS:** bridges, Unites States, durability, maintenance, standardization

## 1. Introducción

El contexto actual de la ingeniería española ha dado a las constructoras y consultoras la oportunidad de participar en el proyecto de puentes de carretera y ferrocarril en los Estados

Unidos. La forma de trabajar allí difiere en muchos aspectos a la habitual con las administraciones españolas, con manuales de obligada aplicación que limitan la libertad de diseño y que dirigen a la adopción de detalles sancionados por la práctica, siendo además estos diferentes en función del estado en cuestión. El resultado es que las empresas constructoras

locales están habituadas a la ejecución de detalles conocidos, dada la alta estandarización que este sistema consigue.

Muchos de estos detalles son interesantes desde el punto de vista de la durabilidad y el mantenimiento de la estructura, ya que han sido estudiados, revisados y modificados por la administración a lo largo de los años basándose en la experiencia de puentes ya construidos.

La parte innovadora de ese proceso es normalmente encargada a universidades, con las que se firma un convenio de investigación, como es el caso de Virginia Polytechnic Institute & State University (Virginia Tech).

WSP Spain – Apia XXI ha tenido la oportunidad de trabajar en el proyecto “Transform 66 Outside the Beltway”, que mejora la capacidad de la autopista interestatal I-66 en un tramo al oeste de Washington DC, siendo Ferrovial la empresa española encargada de la construcción.

## 2. Descripción del proyecto

El proyecto “Transform 66 Outside the Beltway” transformará la autopista interestatal 66, al norte del estado de Virginia, en un corredor multimodal con mayor capacidad y nuevas opciones de viaje. El proyecto es una colaboración público-privada entre el departamento de transporte de Virginia (Virginia Department of Transportation, VDOT), el Departamento de Ferrocarriles y Transporte Público (Department of Rail and Public Transportation DRPT) y el socio privado I-66 Express Mobility Partners formado por Cintra, Meridiam, John Laing y APG.

El proyecto, valorado en 3.7 billones de dólares incluye entre otros la construcción de 36 km de carriles de peaje al lado de los existentes desde la I-495 hasta el University Boulevard en Gainesville, el diseño de nuevos enlaces, 11 km de carriles para bicicletas y peatones y un sistema de peaje dinámico.



Figura 1. Infografía del diseño conceptual del enlace de la ruta 28 con la I-66

El trabajo de WSP Spain – APIA XXI comprende el diseño de una parte del segmento 2, entre los que destaca la reconfiguración del enlace de la ruta 28 con la I-66. En el tramo se encuentran un total de 16 estructuras, con las

siguientes tipologías: puentes de vigas de hormigón pretensado, puentes mixtos de vigas metálicas doble T, y puentes mixtos de vigas metálicas doble T con pórticos metálicos integrales.



**Figura 2. Infografía del diseño conceptual. Puesto mixto con pórtico metálico integral**

En el estado de Virginia, estas tipologías comunes presentan una alta estandarización. En general, estos estándares abarcan unos rangos de utilización, es decir, no son válidos para cualquier estructura. Es un trabajo interesante el de adaptar estos estándares a estructuras más complejas como las que se pueden presentar en un enlace, dado que, aunque la administración está abierta a estos cambios, en general revisan exhaustivamente que se sigan cumpliendo los niveles en cuanto a durabilidad y facilidad de mantenimiento.

A continuación, se muestran algunos de los criterios más interesantes que han sido de aplicación en este proyecto, relativos principalmente a las soluciones para eliminar juntas de calzada y a detalles estructurales en cajones metálicos.

Todos los diseños están basados en la normativa AASHTO [1], con consideraciones adicionales recogidas en el Manual de Estructuras y Puentes de Virginia [2] de VDOT.

### **3. Eliminación de juntas (“jointless philosophy”)**

Gran parte de las tipologías de estribos y pilas estándar del estado de Virginia vienen motivadas por el interés de eliminar las juntas de calzada, minimizando de este modo las tareas de conservación y mantenimiento. El Manual de Estructuras y Puentes de Virginia [2] enfatiza que ha sido ampliamente documentado en informes de inspección de puentes que las juntas

permeables suponen un importante problema de mantenimiento.

De este modo, VDOT permite la utilización de 5 tipologías diferentes de estribos, de las cuales 3 son soluciones que eliminan las juntas de calzada, y una cuarta presenta una solución específica para conducir el agua filtrada a través de la junta hacia el sistema de drenaje, evitando a su vez salpicaduras en los aparatos de apoyo. Cada tipología estándar de estribo presenta un rango específico de utilización en cuanto a longitud total de estructura, esviate y movimientos esperados.

En cuanto a la superestructura, VDOT incentiva la utilización de soluciones continuas. Es de especial interés la utilización de puentes de vigas prefabricadas de hormigón pretensado hechos continuos para la sobrecarga mediante la construcción de un diafragma de continuidad in-situ.

Como ejemplo de colaboración entre VDOT y la universidad, el detalle de la armadura de este elemento fue objeto de un estudio encargado a la Virginia Polytechnic Institute & State University (Virginia Tech), que se materializó en unas conclusiones [3] que se implementaron posteriormente en el Manual de Estructuras y Puentes de Virginia [2].

Cuando por algún motivo no es posible el diseño de una superestructura continua, el estado de Virginia presenta una tipología de pila especial (pila tipo Virginia) que recolecta y conduce el agua que se filtra por la junta hasta el sistema de drenaje.

#### ***3.1 Tipologías de estribo estándar en Virginia***

Una solución frecuentemente utilizada en el estado de Virginia, y que es la base de todas las tipologías estándar de estribo, es el uso de cargaderos pilotados sobre muros de tierra armada o sobre el terraplén del estribo. Como pilotes se usan en general perfiles metálicos, que pueden ser hincados o colocados en perforaciones del terreno competente hasta una

cota por debajo de la de cimentación del muro de tierra armada, y que evitan que los asientos del muro afecten a la estructura. La práctica habitual en estos casos es ubicar en una pila el punto fijo frente a acciones horizontales.



**Figura 3. Construcción de pilotes sobre muro de tierra armada**

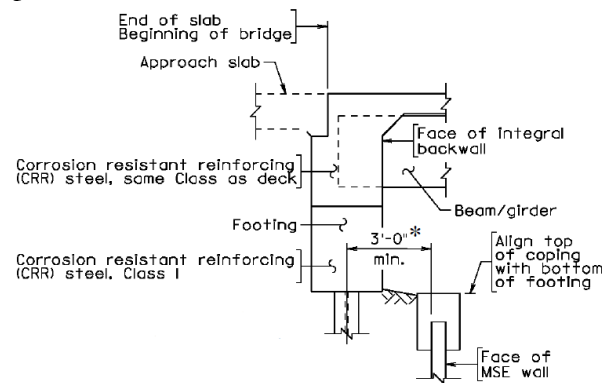
El uso de cargadero pilotado sobre muro de tierra armada es una opción relativamente poco utilizada en España y que es muy interesante en ciertos contextos. Estos estribos separan la función de retención de las tierras de la de transmisión de las cargas verticales, con una construcción muy rápida y relativamente económica, en particular con el uso de pilotes de perfiles metálicos.

Para la selección del tipo de estribo de entre los cinco tipos que se explican a continuación, VDOT establece un orden jerárquico con requisitos claramente señalados para cada uno de ellos. Lógicamente, el criterio principal es la distancia al punto fijo, lo que determina la importancia de los desplazamientos debidos a deformaciones impuestas. El orden de elección es: estribo integral, estribo semi-integral, estribo con losa en voladizo, estribo tipo “Virginia” y estribo convencional en ménsula. El estribo integral presenta los requisitos más restrictivos, usándose el estribo convencional solo en aquellos casos especiales en los que no es posible la elección de los anteriores.

### 3.1.1. Estribo integral

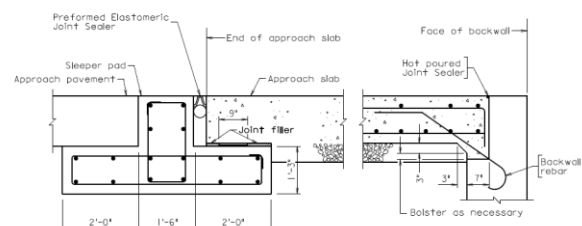
El estribo integral es la primera de las soluciones sin junta. Consiste en un cargadero pilotado

sobre una única fila de pilotes metálicos, encima del cual se apoya el diafragma integral que une todas las vigas y que sostiene la tierra detrás del estribo. Este diafragma se une al cargadero mediante una fila de barras de armadura alineadas que actúan a modo de rótula, permitiendo el giro de las vigas. Este estribo requiere que la estructura sea de vigas rectas y relativamente simétrica, de modo que se obtengan movimientos parecidos en ambos estribos, compensándose así los empujes pasivos.

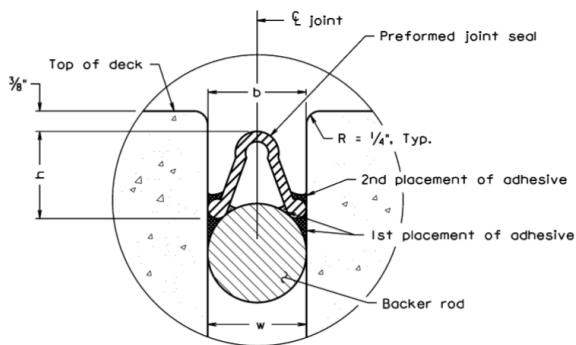


**Figura 4. Estribo integral [2]**

Esta solución busca la mayor flexibilidad posible en los pilotes para hacer frente a las deformaciones impuestas. Por este motivo solo se usa una única fila de pilotes dispuestos con el eje de inercia débil flectando en la dirección longitudinal. La losa de transición es integral con el diafragma de estribo, y se mueve con este. Al final de la losa de transición se construye un durmiente de hormigón con forma de T invertida (sleeper pad), sobre el que se apoya la losa de transición, y sobre el cual se instala una junta de elastómero de silicona con forma de V invertida (ver figuras 5 y 6).



**Figura 5. Terminación de la losa de transición en estribo integrales y semi-integrales**



**Figura 6. Junta de elastómero de silicona extruido [2]**

Los requisitos para la utilización de este tipo de estribo son los siguientes, obtenidos por VDOT con los años de manera empírica:

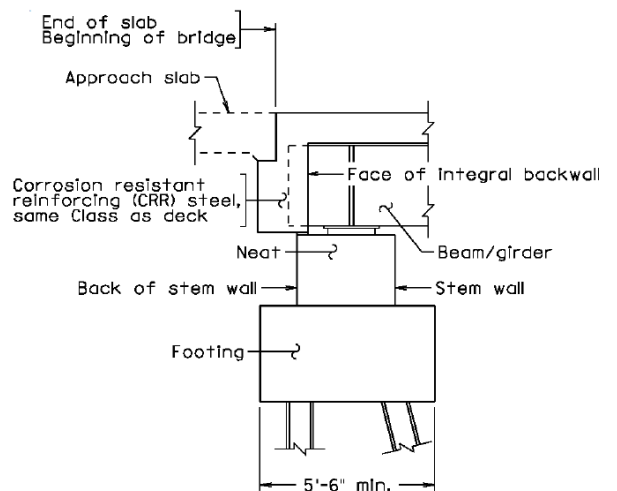
- Movimientos totales en cada estribo inferiores a 38 mm.
- Longitud máxima de 91 m para puentes metálicos sin esviaje y 45 m para esviajes de hasta 30°.
- Longitud máxima de 152 m para puentes de hormigón sin esviaje y 76 m para esviajes de hasta 30°.

### 3.1.2. Estribo semi-integral

El estribo semi-integral es la alternativa cuando alguno de los requisitos para estribos integrales no se cumple. Es también una solución sin junta, pero en este caso las vigas se apoyan sobre aparatos de apoyo en el cargadero. Presenta igualmente un diafragma integral, que sostiene las tierras, y una losa de transición monolítica con el diafragma integral, con el mismo detalle de viga durmiente al final de ésta.

Los requisitos para la utilización de este tipo de estribo son:

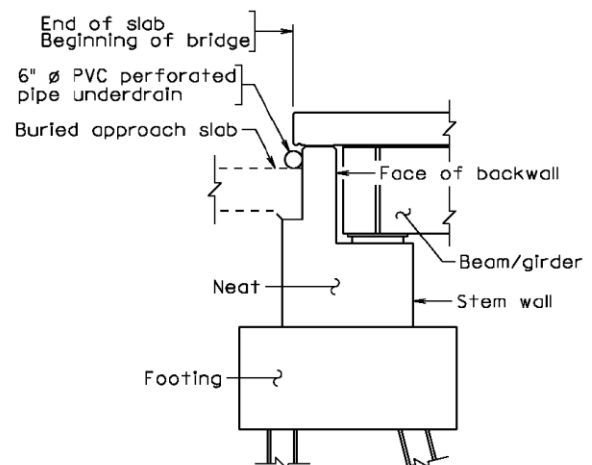
- Movimientos totales en cada estribo inferiores a 57 mm.
- Longitud máxima de 137 m para puentes metálicos rectos con esviajes de hasta 30°.
- Longitud máxima de 228 m para puentes de hormigón rectos con esviajes de hasta 30°.



**Figura 7. Estribo semi-integral [2]**

### 3.1.3. Estribo con losa en voladizo

El estribo con losa en voladizo es el último de las tipologías sin junta. A diferencia del semi-integral el estribo presenta un murete para sostener las tierras. Para evitar la junta entre la losa y el murete, la losa se extiende por encima de éste. Entre la losa y el murete se coloca un pequeño relleno de goma expandida que permite los movimientos en horizontales y verticales, es decir, la losa trabaja en voladizo, sin apoyarse sobre el murete, pero que evita que la tierra pase a la zona de los apoyos.



**Figura 8. Estribo con losa en voladizo [2]**

Por detrás del murete se coloca una tubería de drenaje para recoger el agua proveniente del tablero de la estructura y que se haya filtrado por la junta del final de la losa.

Los requisitos para la utilización de este tipo de estribo son:

- Movimientos totales en cada estribo inferiores a 57mm en puentes rectos e inferiores a 38mm en puentes curvos
- Longitud máxima de 137m para puentes metálicos rectos con esviajes de hasta 45° y 91m para puentes metálicos curvos con esviajes de hasta 30°
- Longitud máxima de 228m para puentes de hormigón rectos con esviajes de hasta 45°

### 3.1.4. Estribo tipo “Virginia”

Para todos aquellos casos en los que los límites marcados para cada uno de los estribos anteriores se vean excedidos y por tanto no sea posible el diseño de una solución sin junta, VDOT plantea una tipología en la que el agua que se filtra a través de la junta de expansión es recogida por un recinto o canal interior (“trough”) y conducida hasta el exterior de la estructura.

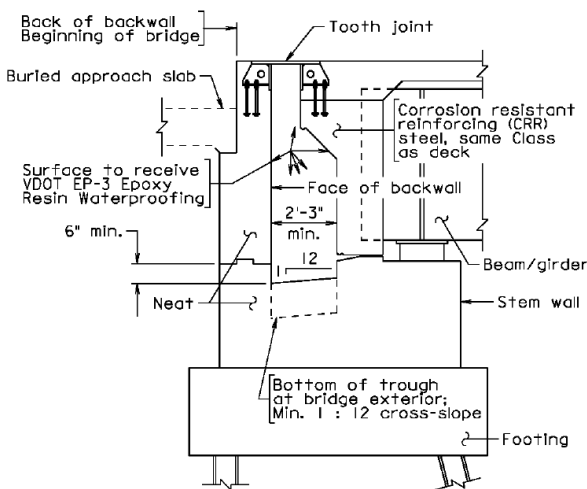


Figura 9. Estribo tipo “Virginia” [2]

Este canal interior, que es accesible desde los laterales del estribo, presenta unas dimensiones mínimas que permiten el acceso de un operario para realizar operaciones de mantenimiento. Así mismo, se diseña con una pendiente 12:1, que facilita la auto limpieza del mismo.

Otro detalle interesante de este estribo es la colocación de un diafragma de hormigón al final de las vigas, independiente del diafragma o marco de apoyos, que facilita la colocación de la

junta y que independiza las mesetas de apoyo del canal de drenaje, impidiendo así salpicaduras sobre los aparatos de apoyo.

En ningún caso se considera la junta como un elemento del sistema de drenaje.

### 3.1.5. Estribo convencional en ménsula

El uso de un estribo convencional se justifica solo en aquellos casos en los que no sea posible la utilización de ninguno de los anteriores. Se ve así que este tipo de estribo, tan común en España, es claramente evitado en Virginia.

### 3.1.6. Detalles de conexión entre el estribo y el muro de tierra armada

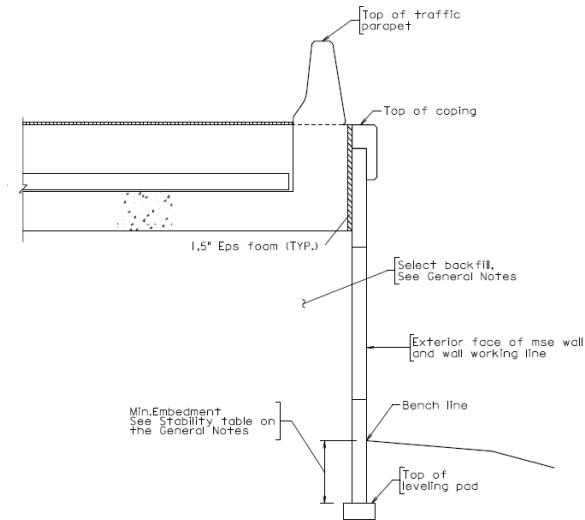
Una solución muy utilizada en los diferentes tipos de estribo estándar es la de cargadero pilotado situado detrás de un muro de tierra armada que sostiene las tierras. Este conjunto presenta la peculiaridad de que el muro con el tiempo asienta respecto al estribo, por lo que los detalles deben de estar pensados para permitir este movimiento sin afectar al resto de elementos estructurales y no estructurales, y evitando que la tierra del muro salga por las juntas.

Se presentan así dos detalles. El primero de ellos está pensado para la zona de la losa de transición. En este caso se quiere evitar que la barrera se apoye sobre el muro, ya que, al estar situada también sobre el murete del estribo, ésta estaría apoyada sobre dos elementos de distinta rigidez, pudiendo producirse fisuras en las barreras, como se han observado en algunos puentes existentes [4].



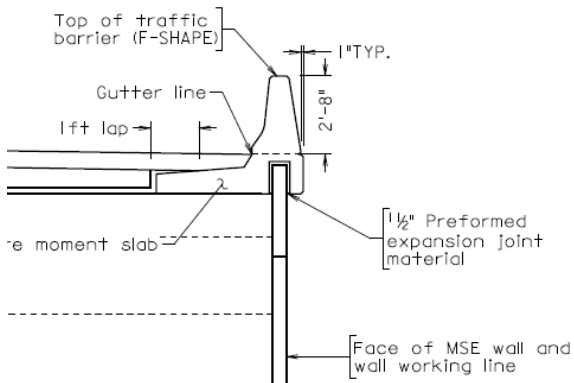
Figura 10. Fisura observada en una barrera montada sobre una “moment slab” [4]

Para evitar que situaciones de este tipo se repitan, el detalle estándar se fue mejorando, situando el muro de tierra armada por el exterior, y no debajo de la barrera. El muro está rematado por un cabezal que une a los paneles, y separado de la losa de transición por un relleno, como se observa en la siguiente figura:



**Figura 11. Detalle de la terminación del muro de tierra armada en la zona de la losa de transición**

El segundo de los detalles es de utilidad para secciones más allá de la losa de transición. En este caso la barrera se apoya sobre lo que se conoce como “moment slab” (ver figura 12). Ésta, además de servir como cabezal del muro de tierra armada, evita que la barrera vuelque en caso de impacto. El panel del muro se embebe en la “moment slab”, pero está independizado de ésta por medio de un relleno, que evita que la barrera se apoye directamente sobre el panel del muro y a su vez impide que la tierra salga, afectando a la estética exterior del muro.

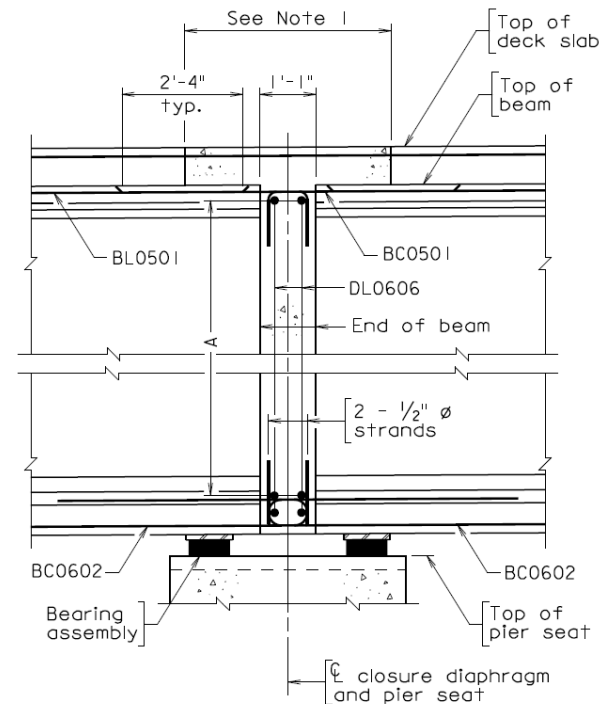


**Figura 12. Detalle de la terminación del muro de tierra armada**

### 3.2 Puentes de vigas pretensadas de hormigón continuos para sobrecarga

Como parte de la filosofía de eliminación de juntas, VDOT favorece la utilización de tableros continuos. En el caso de puentes de vigas de hormigón pretensado, es una práctica habitual el uso de vigas biapoyadas que trabajan como continuas para las cargas muertas y la sobrecarga de tráfico. Esta continuidad se materializa mediante la construcción de un diafragma in-situ sobre las pilas.

El armado de este diafragma es estándar, según la investigación que se llevó a cabo en Virginia Tech [3], como se observa en la siguiente figura. Las armaduras longitudinales de la losa superior son las únicas que se han de calcular a partir de los momentos flectores negativos globales.



**Figura 13. Diafragma de continuidad sobre pila [2]**

### 3.3 Pila tipo “Virginia”

Para aquellas circunstancias en las que los condicionantes del diseño precisen la utilización de una junta de calzada sobre una pila (puentes largos de varias unidades estructurales), VDOT plantea una solución interesante, que es el uso de

la pila tipo “Virginia”. Esta pila es conceptualmente similar al estribo tipo “Virginia”, es decir, presenta un canal de drenaje interior que recoge el agua que se filtra a través de la junta de calzada, y la conduce hasta el exterior.

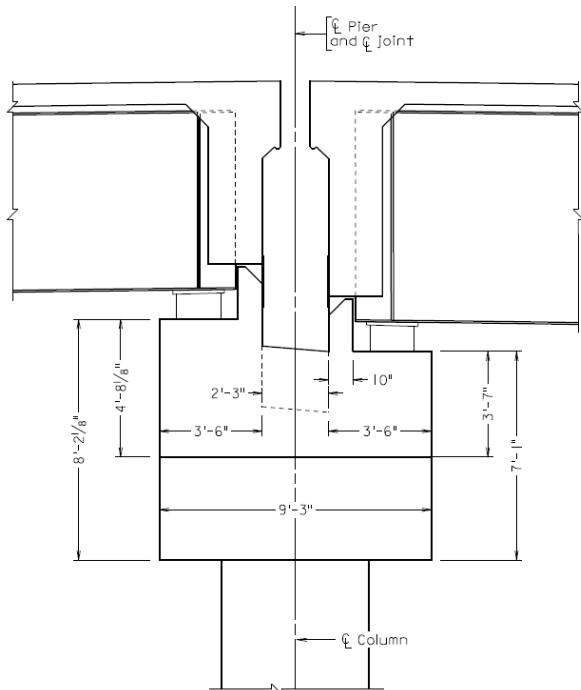


Figura 14. Pila tipo “Virginia”

De mismo modo que en el estribo del mismo nombre, los aparatos de apoyo están protegidos frente a salpicaduras.

Debido a la anchura del cabezal, el uso de esta pila no es siempre posible.

#### 4. Detalles para mejorar durabilidad y el mantenimiento en cajones metálicos

Los cajones metálicos son estructuras altamente congestionadas por la presencia de rigidizadores, diafragmas, tornillos, etc. Una buena concepción en el diseño de todos estos detalles no solo mejora la durabilidad de la estructura, sino que facilita las labores de inspección, mantenimiento o reparación.

En este sentido, VDOT propone y exige toda una serie de normas de buena práctica, basadas en la experiencia en estructuras similares

ya construidas, que pueden resultar muy interesantes para la aplicación en otros contextos.

Estos requisitos engloban tanto especificaciones estructurales como del sistema eléctrico, de drenaje, o detalles constructivos que mejoran la accesibilidad de los operarios al interior del cajón.

Cabe señalar que estos requerimientos están no solo pensados para puentes cajón, sino también para cabezales de pórticos metálicos integrales, en los que las reducidas dimensiones y la congestión que provocan las uniones de las vigas con el cabezal hacen estas cuestiones aún más necesarias.

#### 4.1 Requisitos estructurales

Para evitar la aglomeración de rigidizadores que se produce en ocasiones en los cajones metálicos y para facilitar las tareas de montaje en taller, VDOT desincentiva, como práctica general, el uso de rigidizadores verticales en favor de espesores de chapa mayores. En el caso de los rigidizadores horizontales, su uso no está permitido.

Cuando el diseño haga necesario la conexión de chapas con alas a tracción, se debe considerar cualquier alternativa antes de soldar, como por ejemplo atornillar, incrementar espesores de chapa o incluso alterar la geometría del cajón para evitar la soldadura. Así mismo, la práctica habitual es evitar todo tipo de soldaduras en obra, reservándose éstas solo para el taller. La mayoría de las uniones en obra se realizan por tanto atornilladas.

Se requieren unas dimensiones interiores mínimas en los cajones (1.22m de ancho por 2.13m de alto) para que el cajón sea accesible para el mantenimiento e inspección. Para estructuras que no cumplan estas dimensiones se recomiendan soluciones alternativas como vigas pareadas.

Así mismo, VDOT promueve el uso de rigidizadores y castilletes de apoyo abiertos, de modo que sea posible la inspección visual de los



mismos, no solo durante la construcción, sino también a lo largo de la vida útil de la estructura.

#### 4.2 Requisitos que favorecen la durabilidad

Con objeto de favorecer el drenaje del interior del cajón y evitar acumulaciones de agua que puedan deteriorar la estructura, se requiere que los cajones tengan preferiblemente una pendiente mínima del 2%.

En el interior del cajón, se disponen unos agujeros destinados a la ventilación y drenaje del interior, entre cada diafragma. Estos agujeros, de 50mm de diámetro, se cubren con una malla de acero inoxidable para evitar que entren los insectos o pájaros.

En el caso de los pórticos metálicos, en los que las puertas de acceso se sitúan en los extremos del cajón, estas quedan expuestas a la lluvia. Para evitar que el goteo del agua que discurre por la parte alta del cajón caiga sobre la puerta se instalan unos desviadores encima de la misma, como se puede observar en la figura 15.

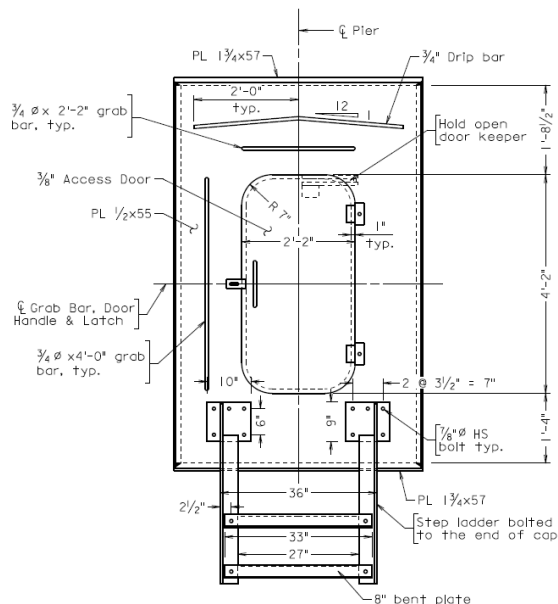


Figura 15. Detalles de la puerta del cajón de un pórtico metálico

Con el objetivo de evitar soldaduras en obra, las uniones entre los diferentes segmentos de las vigas se realizan mediante uniones atornilladas. En el caso de los cajones, en las zonas donde el cubrejuntas no cubre toda la

superficie se generan una ranuras, que deben de ser selladas.

Así mismo, se presta especial atención a la estanqueidad de las puertas de acceso al cajón, cuidando detalles como el sistema de cierre o el sellado de la puerta.

#### 4.3 Accesibilidad

En relación a la accesibilidad y comodidad del operario a la hora de realizar las labores de inspección y mantenimiento, se incluyen numerosos detalles, entre los que destacan los siguientes.

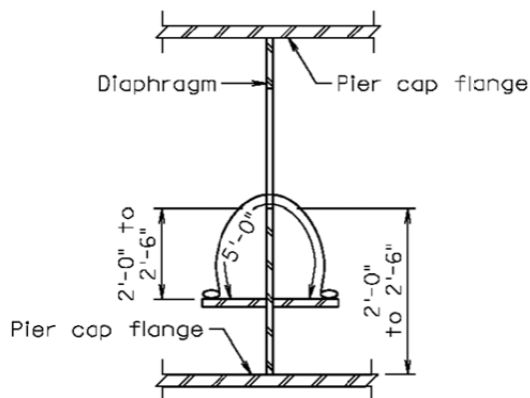
En el caso de los pórticos metálicos, donde las puertas de acceso se sitúan en general en el extremo de cajón, se incluyen un par de peldaños de escalera, que facilitan el acceso del operario desde una escalera o plataforma elevadora (figuras 15 y 16).



Figura 16. Detalles de la puerta de acceso de un pórtico metálico

Por otro lado, para las situaciones en las que el paso de hombre en los diafragmas no se pueda situar a una altura adecuada para que el operario pueda atravesarlo cómodamente, se sitúan peldaños a una altura tal que garantice la ergonomía de la zancada a través del hueco, esto es, si el paso de hombre está situado a más de

75cm del fondo del cajón, se incluye un peldaño de modo que la longitud total de la zancada medida a lo largo del recorrido del pie no exceda los 1.5m (figura 17).



**Figura 17. Ergonomía de la zancada a través del paso de hombre [2]**

Los rigidizadores verticales del paso de hombre se ubican al menos a 150mm del hueco para evitar el efecto túnel que dificultaría el paso del operario. Los rigidizadores horizontales tienen que ser de una dimensión tal que no dificulten la zancada a través del hueco, o en caso contrario, deben de localizarse en una posición que permita su uso como escalón. Así mismo, todos los huecos disponen de agarraderas, al menos en uno de los lados. Si el paso se realiza desde un escalón y no desde el ala inferior del cajón, agarraderas adicionales se disponen sobre el hueco a ambos lados.

Todos los cajones disponen de sistema eléctrico en el interior, que o bien se conecta a la red general, o bien está provisto de un mecanismo que permite la conexión de un generador en el exterior. En este último caso, el mecanismo queda ubicado en el exterior del cajón, pero en una zona protegida de la lluvia o las salpicaduras del tráfico. En el interior, entre cada diafragma, se instalan enchufes que quedan localizados en la zona de compresión y a una altura alcanzable por el inspector. Del mismo modo se dispone un sistema de iluminación interior.

En el caso de pórticos que superen los 30m de longitud, es habitual incluir una tercera puerta en la parte superior del cajón, con una

escalera atornillada a éste que permita el fácil acceso al interior. Todas las puertas están provistas de un sistema mecánico que evita que estas se cierren debido al viento u otras causas.

## 6. Conclusiones

El diseño de puentes en el estado de Virginia (USA) viene determinado por las estrictas normas que estipula el VDOT, basadas en la práctica, la estandarización y los estudios de innovación que realizan junto con universidades de prestigio.

Son de aplicación obligatoria unas tipologías y una serie de detalles constructivos que facilitan la construcción, minimizan errores de diseño y en obra, y que favorecen que las empresas de ingeniería y de construcción locales estén muy familiarizadas con los métodos necesarios.

Los detalles más interesantes se han presentado aquí, ya que se podrían adoptar en puentes españoles.

## 6. Referencias

- [1] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). LRFD Bridge Design Specifications, Seventh Edition (2014).
- [2] Commonwealth of Virginia, Department of Transportation, VDOT Manual of the Structure and Bridge Division, Richmond, 2016.
- [3] Virginia Transportation Research Council and Virginia Polytechnic Institute & State University, Design Recommendations for the Optimized Continuity Diaphragm for Prestressed Concrete Bulb-T Beams, 2008.
- [4] F. Saraf, Lessons learned, 2013 Virginia Concrete Conference, NOVA Megaprojects Program.