

Interventoría de la Primera Línea del Metro de Bogotá (PLMB)

Design and Construction Supervision for the Line 1 of the Bogota Metro

Lola Capdevila González-Navia^a, Mauricio García Chacón^b, Gonzalo Villanueva Uriarte^c, David Gaspar Soriano^d y Luis A. Frias Cerdá^e

^a Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. AYESA Ingeniería y Arquitectura. Jefa de Proyecto. lcapdevila@ayesa.com

^b Máster en ICCP. AYESA Ingeniería y Arquitectura. Ingeniero de Proyecto. mgarciach@ayesa.com

^c Máster en ICCP. AYESA Ingeniería y Arquitectura. Especialista Estructural. gvillanueva@ayesa.com

^d Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. AYESA Ingeniería y Arquitectura. Coordinador de Proyecto. dgaspars@ayesa.com

^e Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. AYESA Ingeniería y Arquitectura. Jefe de Sección de Estructuras. lafrias@ayesa.com

RESUMEN

AYESA, como parte del Consorcio Supervisor PLMB, ha llevado a cabo la interventoría integral de la Primera Línea del Metro de Bogotá, que aborda tanto la supervisión técnica, como la económica, jurídica y administrativa, en las fases de diseño, fabricación, puesta en marcha y operación. La presente comunicación se centrará en los aspectos técnicos en fases de diseño y ejecución. El promotor de la obra es la Empresa Metro de Bogotá (EMB), que adjudicó la concesión al consorcio Metro Línea 1 SAS, integrada por las empresas de origen chino China Harbour Engineering Company Limited y Xi'An Metro Company Limited, que a su vez subcontrató los diseños estructurales a la ingeniería WSP.

ABSTRACT

AYESA, as part of the Consorcio Supervisor PLMB, has carried out the comprehensive auditing of the Line 1 of the Bogota Metro, which includes technical, economic, legal and administrative supervision in the phases of design, construction, launching and operation. This paper will focus on the technical aspects of the design and construction phases. The developer of the project is Empresa Metro de Bogotá (EMB), which awarded the concession to the Metro Línea 1 SAS, a consortium comprised of the Chinese companies China Harbour Engineering Company Limited and Xi'An Metro Company Limited, which in turn subcontracted the structural designs to WSP.

PALABRAS CLAVE: Metro, Bogotá, Viaducto, “Viga gran U”, Viga lanzadora, Pilotes PHC.

KEYWORDS: Metro, Bogotá, Viaduct, “Viga gran U”, Launching beam, PHC piles.

1. Introducción

AYESA ha llevado a cabo la Interventoría de la Primera Línea del Metro de Bogotá (PLMB). Se trata de una de las obras más esperadas de Latinoamérica, y será una de las líneas más extensas del continente. Los trabajos a desarrollar por AYESA abarcan desde la fase

previa (supervisión del diseño de la obra) hasta la construcción, fabricación, pruebas, puesta en marcha y operación durante los dos primeros años.

La primera línea del metro se resuelve mediante una solución elevada, con 23.9 km de

viaducto, unos 750 vanos, y 16 estaciones, además de varias obras complementarias entre las que se encuentran dos viaductos vehiculares por voladizos sucesivos, dos pasos inferiores subterráneos y las edificaciones del Patio Taller.

La solución típica del viaducto consiste en vanos isostáticos con luces máximas de 35m y sección denominada “Viga Gran U”, de 2 m de canto y anchos 9.60 m y 10 m. La sección consiste en una única viga con forma de U conformada por una losa de 0.36 m de canto mínimo que alberga las dos vías ferroviarias, y dos almas ligeramente inclinadas para los paseos de servicio. Se ejecuta mediante vigas lanzadoras con dovelas de 2.9 m de ancho máximo, y pretensado posteso.

Cuando, debido a requerimientos ferroviarios, es necesario suprimir juntas sobre algunas pilas, o cuando se requiere salvar luces ligeramente superiores, se aplica la solución mediante “Viga Gran U” en 2 vanos de 45 m dando continuidad *in situ* en la pila central.

En otros emplazamientos, en los que las luces a salvar son mayores, se han planteado soluciones especiales mediante tableros mixtos y de voladizos sucesivos.

En cuanto a la subestructura, la solución típica consiste en pilas monofuste con cimentación profunda, mediante pilotes preexcavados o PHC (por sus siglas en inglés *Pretensioned spun High strength Concrete pile*).



Figura 1. Representación de un tramo tipo con estación al fondo.

2. Fase previa: diseño de la obra

El diseño del viaducto, así como los procesos de revisión, inició en el año 2021, partiendo de un Diseño de Referencia contenido en el Contrato de Concesión.

Sin cambios significativos en la ubicación de las pilas, por factores como límites de intervención, afectación de redes y vías, así como estandarización de luces y posición de equipamientos de vías sobre el tablero, se fue modificando la posición de estas hasta su configuración definitiva, permitiendo definir el número de vanos y sus luces, así como el número y tipología de pilas a disponer en los apoyos.

2.1 Viaducto ferroviario. Superestructura

Para la solución de la superestructura, se plantearon cinco tipologías de tablero:

2.1.1. Vano estándar: Viga Gran U

La solución de gran parte de los vanos del trazado del viaducto se realiza mediante el tablero estándar, consistente en la denominada “Viga Gran U”. La sección transversal tiene forma de U y está conformada por una losa inferior que alberga las dos vías ferroviarias, y dos almas ligeramente inclinadas para los paseos de servicio. La viga tiene 2.0 m de canto y ancho de 9.6 m y 10.0 m. Las almas tienen un espesor de 0.325 m y la losa inferior de 0.36 m; ambas cuentan con recrecidos en las zonas de apoyo.

Esta solución se emplea en vanos isostáticos de hasta 35 m de luz, y se ejecuta mediante vigas lanzadoras con dovelas de 2.9 m de ancho máximo, y pretensado posteso. El número de dovelas por vano varía entre 8 y 13.

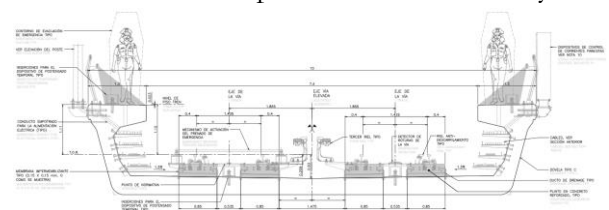


Figura 2. Sección transversal de “Viga Gran U”.

2.1.2. Viga Gran U semicontinua

En luces superiores a 35 m y hasta 45 m, se opta por una solución con la misma sección en “Viga Gran U” en la que se da continuidad *in situ* a dos vanos consecutivos sobre el apoyo intermedio.

Dicha solución emplea hasta 15 dovelas prefabricadas por cada vano y es ejecutada en

dos fases: (i) una fase isostática en la que se disponen los dos vanos contiguos mediante viga de lanzamiento, para (ii) posteriormente dar la continuidad final sobre la pila central a través de una dovela hormigonada *in situ*.



Figura 3. Trazado de La Primera Línea de Metro de Bogotá.

2.1.3. Tablero mixto. Cajones

La solución de tablero mixto con cajones se emplea en dos ubicaciones: los primeros dos vanos del viaducto, junto al Patio Taller con trazado curvo y luces 2 x 60 m, y entre las estaciones 9 y 10, con un trazado recto y 2 x 70 m de luz.

La sección transversal consiste en dos cajones metálicos, coronados por una losa de hormigón armado. Se añaden sendas barreras prefabricadas para realizar la función de contención y de paseo de servicio, así como para dar continuidad estética a la “Viga Gran U”.

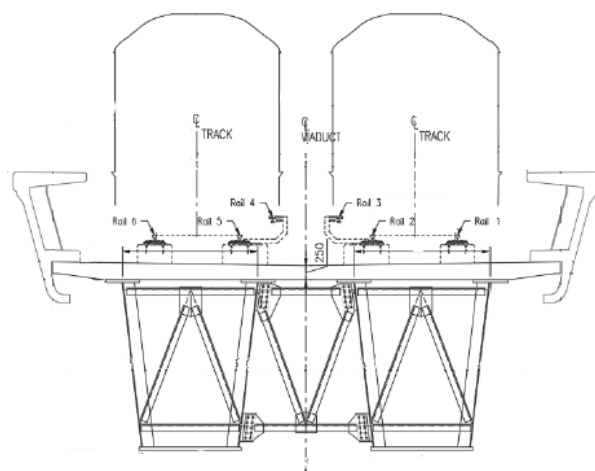


Figura 4. Sección del viaducto especial: Tablero mixto - cajones.

2.1.4. Tablero mixto. Vigas doble T

Puesto que se prevé una futura ampliación de desvío del trazado, se ejecuta una bifurcación en “Y” en las vías entre el Patio Taller y la Estación 1, mediante 4 vanos de 30 m, que se resuelve

mediante 6 vigas doble T metálicas, que se van separando para materializar el desvío. La sección se completa con una losa de compresión de hormigón armado y barreras prefabricadas homólogas a las de los viaductos con cajones mixtos.

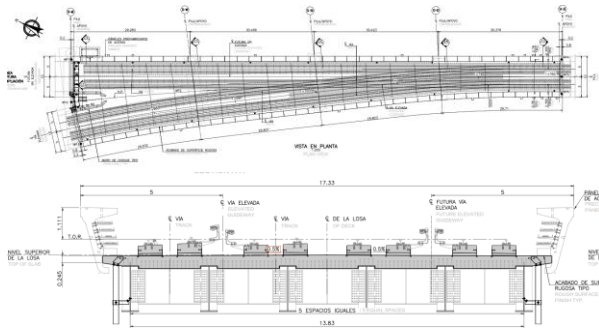


Figura 5. Planta y sección del viaducto para futura ampliación: Tablero mixto – vigas doble T.

2.1.5. Viaducto por voladizos sucesivos

Se ejecutarán dos viaductos por voladizos sucesivos, con sección cajón de hormigón pretensado. El primero de ellos se sitúa entre las estaciones 9 y 10, y tiene un trazado curvo, con luces de 45+70+45 m; mientras que el segundo tiene un trazado recto, con luces de 60+100+60 m. Los voladizos son coronados por las mismas barreras descritas en los viaductos mixtos.

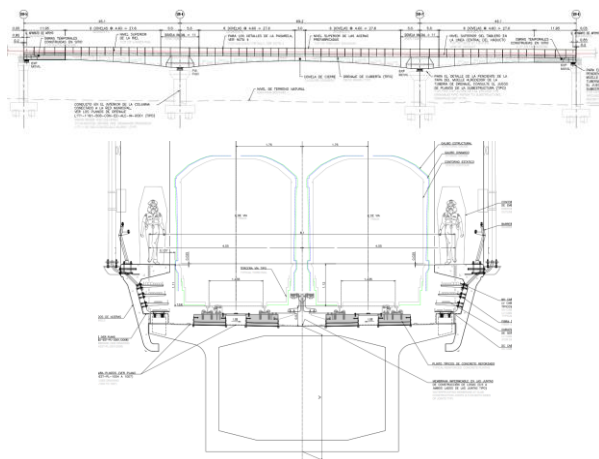


Figura 6. Alzado y sección del viaducto especial: Voladizos sucesivos 45+70+45 m.

Ambos viaductos se apoyan en cuatro pilas mediante apoyos de neopreno, de modo que no existe monolitismo entre tablero y pilas. Durante el proceso constructivo, el equilibrio se garantiza mediante el empleo de barras verticales de sujeción temporal en las pilas centrales. Estas

barras de estabilidad son postesas, y se anclan en la viga cabezal de las pilas y en la cara superior del tablero, y son retiradas una vez se haya completado el tablero con la colocación de la dovela de cierre.

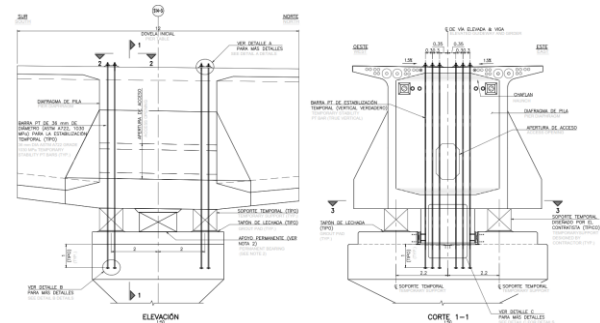


Figura 7. Barras de estabilización temporal en viaductos por voladizos sucesivos

2.2 Viaducto ferroviario. Subestructura

2.2.1. Cimentación

La cimentación de las pilas, profunda, se resuelve mediante dos tipologías de pilotes: pilotes preexcavados *in situ* (diámetros de 1.5 a 2.0 m y hormigón $f_c=28$ MPa) y pilotes “empujados” prefabricados PHC con sección anular (diámetro exterior igual a 1.0 m, espesor de pared de 0.14 m y hormigón $f_c=55$ MPa).

Estos últimos son pilotes prefabricados hincados mediante presión constante (para evitar vibraciones y ruidos en el entorno urbano), elegidos con la intención de agilizar el proceso de fabricación y ejecución de la gran cantidad de pilotes del viaducto, allí donde el terreno permita su hincado.

Los encepados, a lo largo de todo el trazado del viaducto en interestaciones, encajan de 4 a 25 pilotes con longitudes que ascienden hasta los 61 m.

2.2.2. Pilas

Las pilas son, en general, monofuste con sección circular con un diámetro típico de 2.5 m y un máximo de 3.0 m, y viga cabezal como cargadero.

Sin embargo, a lo largo del viaducto se presentan variaciones en diferentes apoyos: Por necesidades en la excentricidad del fuste

respecto al tablero, así como para dar soporte al tablero mixto de la futura ampliación, en ciertos puntos se emplean pilas con cabezales excéntricos o pilas tipo pórtico de dos columnas (Figura 9).

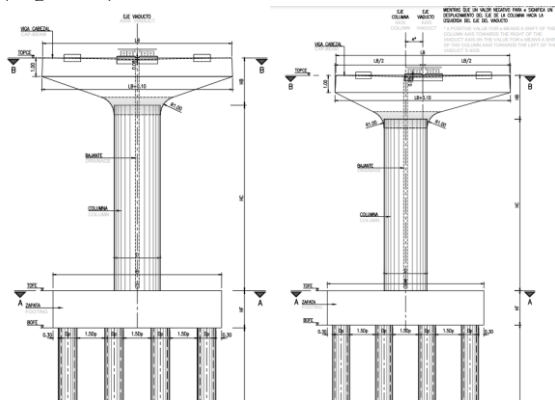


Figura 8. Pilas estándar (izq) y excéntricas (der).

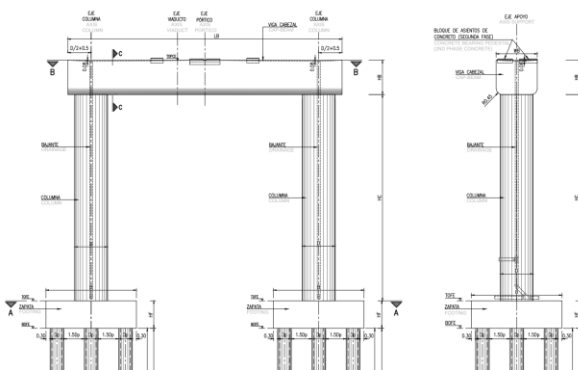


Figura 9. Pila tipo pórtico.

Las pilas situadas sobre estaciones BRT (*Bus Rapid Transit*) se resuelven mediante pórticos con dos fustes de sección ‘elíptica’ (mayor dimensión en el sentido longitudinal que en el transversal), debido a la necesidad de permitir mayores anchos de circulación de usuarios.

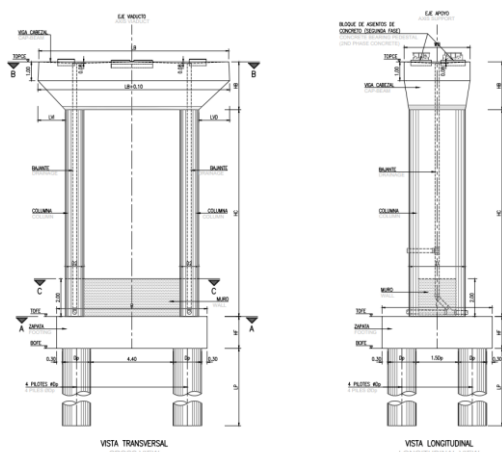


Figura 10. Pilas tipo BRT – Doble fuste ‘elíptico’.

2.2.3. Aparatos de apoyo

Atendiendo en el sistema de apoyo del tablero sobre las pilas, como esquema aplicado a los vanos estándar, se emplean neoprenos zunchados y fijación transversal en ambos apoyos de la viga U. Adicionalmente, se realiza fijación en el sentido longitudinal en uno de ellos, de manera que se tiene un apoyo fijo y un apoyo móvil en cada vano.

2.3 Estaciones Metro

La PLMB tendrá 16 estaciones, como se aprecia en la Figura 3, donde 10 de estas se interconectarán con estaciones del sistema de autobuses BRT de la ciudad.

El tablero de las estaciones está formado por vigas cajón (multicelda) de hormigón pretensado, con postesado transversal, para su comportamiento monolítico, y longitudinal. Dicha geometría se ha elegido para que su apariencia exterior sea similar a la de la “Viga Gran U” del viaducto en interestaciones. Su esquema estructural es isostático.

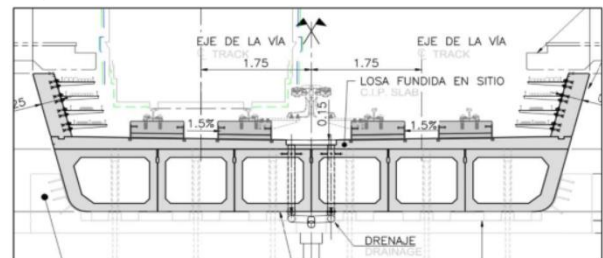


Figura 11. Viga cajón en Estaciones.

Por su tipología, se distinguen 3 clases de estaciones: 11 Estaciones Descentralizadas, 4 Estaciones Mezanine y una Estación Especial.

2.3.1. Estaciones Descentralizadas

Corresponden a 11 estaciones en las que el acceso se realiza a través de edificios laterales, conectados mediante pasarelas a la nave central.

El esquema estructural de la nave central es análogo al de un viaducto, al que se le añaden sendos cajones mixtos para las plataformas de acceso, así como una estructura de cubierta.

La sección transversal del tablero es la descrita anteriormente e ilustrada en la Figura 11;

mientras que la subestructura, al igual que en el viaducto, se compone de pilas monofuste o de pórticos con fustes ‘elípticos’. Del mismo modo, la cimentación es profunda, mediante pilotes preexcavados o PHC.



Figura 12. Estaciones descentralizadas.

2.3.2. Estaciones Mezanine

Cuatro de las estaciones presentan una tipología denominada Mezanine, puesto que presentan una planta intermedia para el cambio de andén. Esta tipología corresponde a un edificio integral, en el que el acceso se hace en la planta inferior, sin necesidad de edificios adicionales para ello.

La viga que soporta el tráfico ferroviario se ilustra en la Figura 11, pero esta descansa sobre el edificio. El tablero va acompañado también por vigas mixtas de cajón metálico lateralmente para el soporte de los andenes.

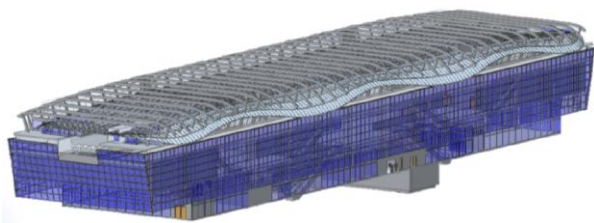


Figura 13. Estaciones Mezanine.

2.3.3. Estación Especial

Para la estación 7 (Av. 68) se emplea una tipología mixta entre las dos anteriores. Se puede acceder a nivel de calle a la nave central en su tramo inicial (lado Oeste), presentando una planta intermedia para el cambio de andén, y dos edificios de acceso laterales en su tramo final (lado Este) con pasarelas de conexión con los andenes en la nave central.



Figura 14. Estación Especial – E7: Av. 68.

2.4 Estructuras complementarias

Incluidos en el proyecto de la PLMB, existen estructuras adicionales, como las ubicadas en el Patio Taller, así como otras estructuras necesarias para la adaptación al nuevo entorno, como pasos inferiores (uno vehicular y otro peatonal), y dos puentes vehiculares que se describen a continuación.

2.4.1. Puentes vehiculares Av. 68

En la intersección del trazado ferroviario con la Avenida 68, existía un puente vehicular de doble sentido que permitía el paso de la Avenida 1 de Mayo sobre la Avenida 68. Este puente se ha demolido y reemplazado por dos puentes independientes, uno por cada sentido de tráfico vehicular para permitir que el viaducto ferroviario se sitúe entre ellos.

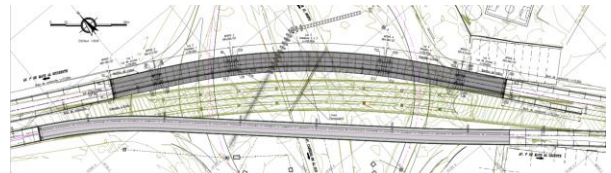


Figura 15. Planta de ubicación de los Puentes Vehiculares Av. 68.

La solución adoptada para estas dos estructuras consiste en sendos viaductos por voladizos sucesivos para los vanos principales, acompañados de vanos de acceso ejecutados mediante cimbrado convencional, presentando continuidad en toda su longitud. La principal diferencia frente a los viaductos por voladizos sucesivos del sistema metro es su unión rígida con las pilas centrales. En los demás apoyos, el tablero descansa sobre neoprenos.

El Puente Norte presenta luces de 29.60+50.40+100+50.40+29.60 m, con un trazado en planta y una rasante curvos. La

sección es un cajón de hormigón posteso, con un canto variable de 2.0 a 5.0 m y un ancho de 12.95 m, dando cabida a 3 carriles vehiculares y un carril de bicicleta. Su cimentación es profunda, con pilotes preexcavados de longitudes entre 36 y 59 m.

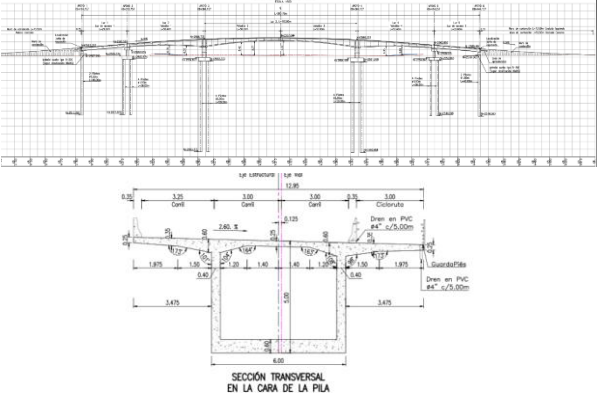


Figura 16. Puente Vehicular Norte. Alzado y sección.

Por otro lado, el Puente Sur presenta luces de 29.60+62.40+125+62.40+29.60 m, con un trazado en planta esencialmente recto. La sección es similar a la del puente norte, con cantos que varían entre 2.00 a 5.75 m y ancho de 9.95 m, puesto que acoge únicamente a 3 carriles vehiculares. Sus pilotes tienen longitudes entre 35 y 67 m.

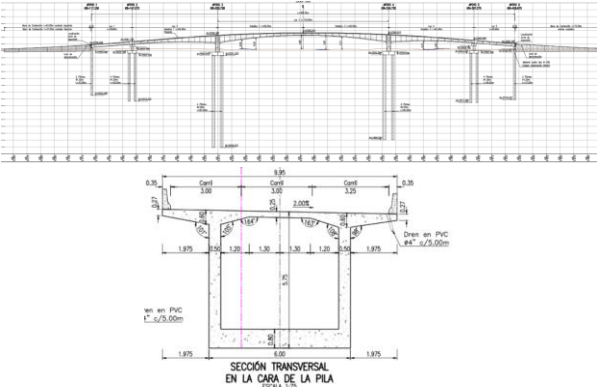


Figura 17. Puente Vehicular Sur. Alzado y sección.

3. Construcción y fabricación

En primer lugar, cabe destacar que la construcción de la PLMB se ha dividido en 6 frentes de obra (*Work Fronts*), los cuales abarcan los 23.9 km de viaducto. Todos ellos, son alimentados desde el depósito de Patio Taller, donde se ubican las plantas de prefabricación para los pilotes PHC, las dovelas para las “Vigas

U” y los segmentos de vigas cajón para estaciones.

A mediados del año 2023 iniciaron las actividades de cimentación a través de pilotes hincados y pilotes preexcavados.



Figura 18. Pilotes PHC (izq) y preexcavados (der)

En el año 2024 se comenzó con la ejecución de zapatas, pilas y capiteles, elementos que forman parte de la subestructura del viaducto, considerando que estas actividades forman parte de la ruta crítica del proyecto y son predecesoras para la colocación de las “Vigas U”. Se espera que las obras correspondientes con la estructura del viaducto finalicen a finales del año 2026.

A continuación, se presenta un avance de la ejecución de los principales elementos del viaducto, a fecha de febrero de 2025.

Tabla 1. Avances subestructura.

Tipo	Totales	Avance Febrero 2025	%Avance
Pilotes	8716	5254	60.28
PHC	7041	4407	62.59
Preexcavados	1675	847	50.57
Encepados	825	331	40.12
Pilas	917	312	34.02
Capiteles	742	178	23.99

Tabla 2. Avances superestructura “Vigas U”.

Tipo	Totales	Avance Febrero 2025	%Avance
Dovelas U - Fabricación	7628	2339	30.66
Dovelas U - Instaladas	7628	1153	15.12
Vanos Viga U isostáticos	580	98	16.90
Vanos Viga U semicontinos	51	4	7.84

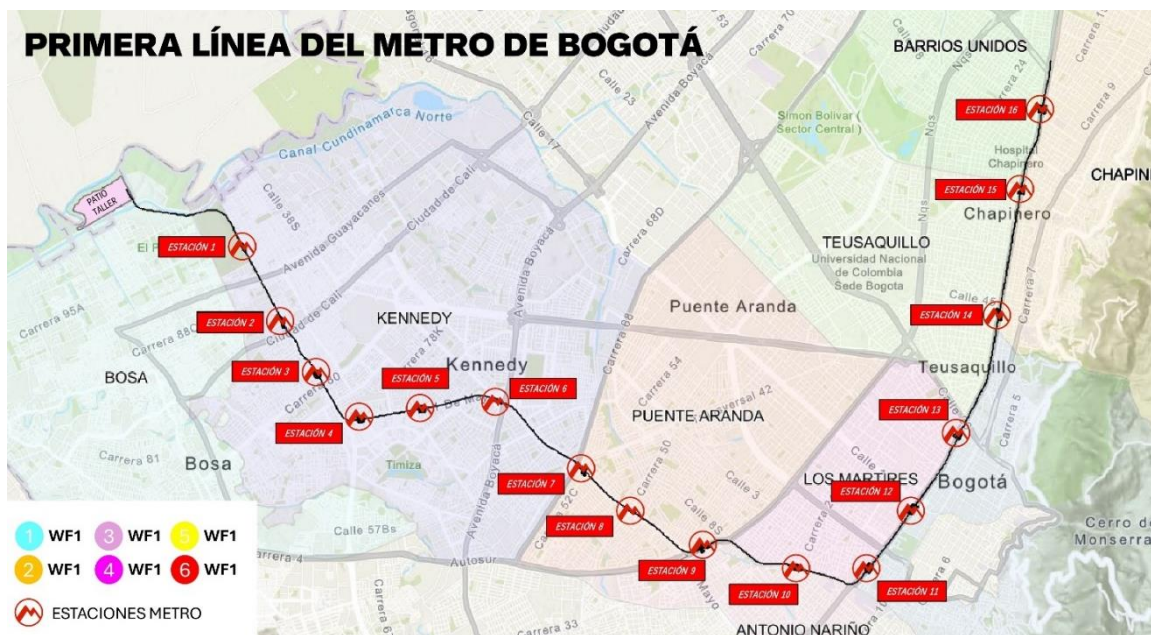


Figura 19. Distribución de los frentes de obra a lo largo del proyecto.

3.1 Rendimientos de fabricación y montaje de dovelas

Para la producción de los elementos prefabricados que componen el viaducto, se cuenta con 3 plantas de producción ubicadas en Patio Taller: (i) Planta de prefabricados de PHC que cuenta con 64 moldes y 4 centrifugadoras para la fabricación de hasta 360 secciones de entre 6 y 15 m de longitud de pilote prefabricado a la semana; (ii) Planta de prefabricados de dovelas “Vigas U”, con 5 líneas de producción con 38 moldes para fabricar una media de 80 dovelas a la semana; y (iii) Planta de prefabricados de segmentos de vigas cajón para estaciones con 7 encofrados para la fabricación de una media de 9 segmentos de vigas cajón, de longitud estándar de 30 m, a la semana.

A principios del año 2024 se inició con la construcción de la subestructura del viaducto, y en la actualidad el ritmo en su ejecución es del orden de 10 apoyos completos a la semana (encepados, columnas y capiteles).

Para la ejecución de la superestructura del viaducto, compuesta por vanos formados por segmentos de “Vigas U” y vigas cajón en estaciones, adicional a tramos especiales formados por estructuras metálicas y voladizos

sucesivos, se tiene previsto contar con 8 vigas lanzadoras que se apoyan sobre los capiteles, elevando cada una de las dovelas de “Vigas U”, para posteriormente realizar el proceso de postesado y proceso de descenso del vano a su posición definitiva como viga simplemente apoyada.

Desde mediados del año 2024 se comenzó con la instalación (izado y postensado) de las primeras dovelas de “Vigas U” y se han venido ajustando los tiempos, realizando entre 1-2 vanos semanales de entre 30 y 45 m (de 8 a 15 dovelas), con una ejecución mensual de 120-140 m por cada una de las vigas lanzadoras, lo que representa un avance mensual aproximado de 1000-1100 m de superestructura de viaducto, una vez que se cuente con la operación simultánea de los 8 equipos que se prevén que estén distribuidos a lo largo del proyecto.

Para la superestructura en las estaciones, después de completar el izaje de los 6 segmentos de vigas en cada tramo, se instala el pretensado transversal para conectar los segmentos en un conjunto integral, implicando la necesidad en la fabricación de 588 de estos segmentos que habilitan la continuidad del viaducto en estaciones.

3.2 Metodología de transporte de dovelas

En cuanto a la metodología de transporte de las “Vigas U”, existen dos tipologías de transporte; una inicial del patio de prefabricados al patio de almacenamiento (ambos situados dentro del Patio Taller), y otra del patio de almacenamiento a la alimentación de las vigas lanzadoras.



Figura 20. Disposición del patio de prefabricados de “Vigas U”.

El área de prefabricación se divide para el área de “Vigas U” (7628 dovelas) y el de vigas cajón para estaciones. Según el diseño, las “Vigas U”, se pueden clasificar en varios tipos: A, C, D, G, junto con los segmentos de transición gradual, B, E y F. Cada tipo de segmento se divide en los modelos W1 y W2 según el ancho de la plataforma del viaducto.

En cuanto al proceso de transporte de los segmentos prefabricados de “Vigas U” del patio de prefabricados al patio de almacenamiento, inicialmente se izan con la ayuda de una grúa pòrtico de 80 t, con un dispositivo de izado de 65 t de capacidad.

Una vez izada la dovela se transporta mediante camiones hasta el patio de almacenamiento, donde se realiza el descargue de la “Viga U” de la misma manera.

En primer lugar, las vigas son inspeccionadas y etiquetadas en el patio de almacenamiento para asegurar que cumplen con las especificaciones requeridas y para organizar su traslado según el orden necesario. Una vez verificadas, las vigas se cargan en camiones con cama baja utilizando grúas pòrtico. En esta etapa, se colocan apoyos de neopreno en la cama baja para distribuir uniformemente el peso y

proteger la integridad estructural de las vigas. Además, se aseguran con cadenas y dispositivos de amarre, garantizando que estén firmemente fijadas.



Figura 21. Dispositivo de izado de una dovela de la “Viga U”.

El transporte se realiza por rutas previamente analizadas (“Rutogramas”) para minimizar riesgos, evitar interferencias con el tráfico y optimizar los tiempos de traslado.

Los vehículos se desplazan a velocidades controladas, generalmente entre 5 y 15 km/h, reduciéndose a 4-5 km/h en estructuras sensibles como el puente del canal Cundinamarca. Durante el recorrido, se implementa señalización adecuada, y personal auxiliar de tránsito asiste en los puntos críticos para garantizar un desplazamiento seguro.

Al llegar a las vigas lanzadoras, las dovelas son descargadas e izadas mediante tres métodos principales: el izado directo desde la cama baja con la grúa de la lanzadora, el uso de una grúa auxiliar si el espacio es limitado o una combinación de ambos métodos dependiendo de las condiciones del lugar.

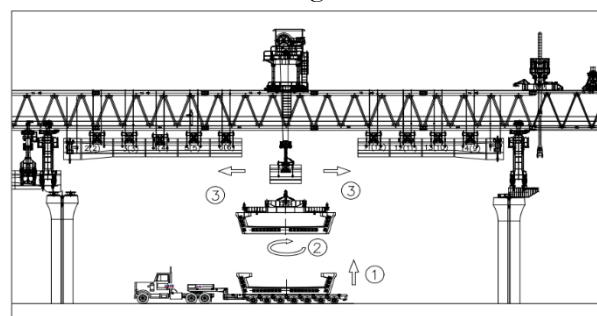


Figura 22. Esquema de izado de “Viga U”- Método de descargue directo.

