

Estaciones subterráneas de metro construidas con pozos secantes – Estación São Joaquim. Línea 6 Metro São Paulo

*Underground metro stations built with secant shafts – São Joaquim Station.
Line 6 São Paulo Metro*

Manuel Jiménez Hernández^a, Lucio Souza Pereira Matteucci^b,
José María Creus Fernández^c, Carlos Peña Chueca^d, Cristian Jesús Sánchez Correa^e,
Pedro Rey Antón^f, Rodrigo Pagnussat^g, Michel Rodrigues de Almeida^h.

^aIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. ACCIONA Infraestructuras. Director Contrato Línea 6 Metro São Paulo.

manuel.jimenez.hernandez@acciona.com

^bIngeniero Civil. ACCIONA Infraestructuras. Director Contrato Línea 6 Metro São Paulo.

lmatteucci@acciona.com

^cIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. ACCIONA Infraestructuras. Director Ingeniería Línea 6 Metro São Paulo.

josemaria.creus.fernandez@acciona.com

^dIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. ACCIONA Infraestructuras. Gerente Oficina Técnica Línea 6 Metro São Paulo.

capenac@acciona.com

^eIngeniero Industrial. ACCIONA Infraestructuras. Especialista Estructuras Línea 6 Metro São Paulo.

cjsanchez@acciona.com

^fArquitecto. ACCIONA Infraestructuras. BIM Manager Línea 6 Metro São Paulo.

pedro.rey.anton@acciona.com

^gIngeniero Civil. ACCIONA Infraestructuras. Coordinador Estructuras Línea 6 Metro São Paulo.

rpagnussat@acciona.com

^hIngeniero Civil. ACCIONA Infraestructuras. Gerente Ingeniería Línea 6 Metro São Paulo.

michel.rodrigues.almeida@acciona.com

RESUMEN

La construcción de estaciones de metro subterráneas mediante el sistema de excavación con pozos secantes de gran tamaño es una alternativa al tradicional sistema “cut and cover”, muy indicada en aquellas situaciones que presenten elevadas profundidades. Estas estructuras de pozos secantes permiten que la estructura trabaje principalmente a compresión; lo cual, en comparación con las estaciones excavadas con pantallas, da lugar a menores espesores de revestimiento finales y a menores cuantías de acero, así como a una menor cantidad de arriostramientos necesarios; tanto para las paredes en fase definitiva como para el revestimiento primario durante la fase de excavación del pozo.

ABSTRACT

The construction of underground metro stations using the excavation system with big sized secant shafts is an alternative to the traditional “cut and cover” system, which is well suited for situations with deep excavations. Secant shafts structures allow the structure to work primarily in compression, which, compared to stations excavated with retaining walls, results in lower final concrete thicknesses and lower reinforcement bar's ratio, as well as a lower amount of propping required, both for the walls in the final phase and for the primary lining during the shaft excavation phase.

PALABRAS CLAVE: Proyecto de estructuras de hormigón, Pozos secantes, Estaciones de Metro.

KEYWORDS: Project of concrete structures, Secant shafts, Metro Stations.

1. Introducción

1.1 Metodología constructiva

La metodología constructiva de excavación y ejecución de pozos secantes permite la materialización de grandes espacios subterráneos, cuya alternativa constructiva es el “cut and cover”. Para poder materializar una superficie “alargada” mediante pozos se requiere que estos, respetando la geometría circular, sean secantes entre ellos. El punto clave de este procedimiento es la ejecución de lo que se llama el “pórtico de alargamiento”, el cual se halla situado en la intersección entre dos pozos, permitiendo proporcionar a ambos la rigidez necesaria para mantener a los mismos trabajando por forma (siempre en compresión).

Para poder materializar dicho pórtico es necesario ejecutar una primera fase constructiva consistente en un primer pozo, llamado “pozo de ataque”, que permite generar un espacio de trabajo para la ejecución del citado pórtico. Este pórtico permitirá en una siguiente fase la excavación y proyección de los dos pozos laterales, o de “alargamiento”, por avances y de manera simultánea, mientras se realiza la demolición de la pared primaria del pozo de ataque.

Una vez llegado al fondo de los pozos secantes, se construye por completo la losa de fondo y se procede a ejecutar el revestimiento secundario, el cual también queda conectado al pórtico de alargamiento antes comentado. En este proceso los estampidores del pórtico pasan a tener un uso adicional para sustentar los niveles interiores de la estación. En la Figura 1, se puede observar uno de los frentes de obra de la Línea 6 del Metro de Sao Paulo, actualmente en ejecución, donde se muestra un *shaft* de cuatro pozos secantes que genera el espacio suficiente para el montaje y partida de las dos tuneladoras.

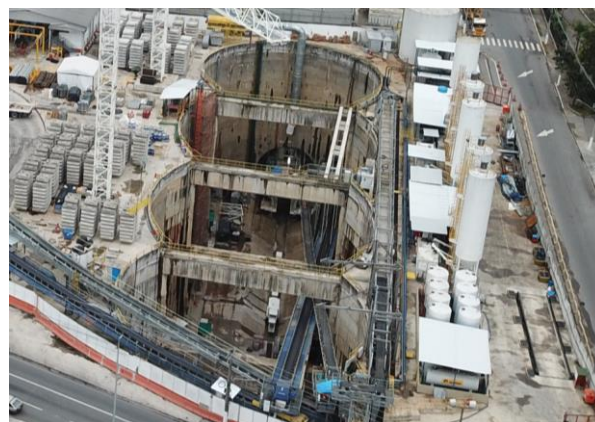


Figura 1. Imagen del pozo Tietê para arranque de las tuneladoras. Línea 6 del Metro de Sao Paulo.

Una tipología muy usada en Brasil, pero no tan común fuera de sus fronteras. Destaca el caso del Pozo “Caterpillar” construido en el proyecto HS2’s west London site, que ha ahorrado una gran cantidad de espacio y carbono [1].

1.2 Descripción de la estructura

La estación de São Joaquim se encuentra en la zona sur de la obra de la Línea 6 del Metro de São Paulo. Debido a que se trata de una estación intermodal que conectará esta línea con la Línea 1 ya existente, los requerimientos de flujo de pasajeros, la poca disponibilidad de terrenos y la profundidad de la línea obligaron a buscar una alternativa que permitiera la ubicación de grupos de escaleras mecánicas para el acceso a la plataforma de la vía. Este factor fue el que originó la solución que se ve reflejada en la Figura 2, formada en planta por dos círculos secantes de radio interior 36 m. El pozo de ataque presenta un radio interior de 35 m con una profundidad de 52 m. La estructura interna de la estación está compuesta por 6 pisos principales (elevaciones) confinados por un revestimiento secundario de aproximadamente 42 m de profundidad. Este revestimiento

secundario está compuesto por dos cilindros secantes, dando una forma final similar a un cacahuete. Aun considerado como estructura interna, existe otra elevación de piso, aproximadamente 7m por encima del pozo, de forma rectangular (zanja). Sobre este nivel se encuentra el edificio técnico y operacional.

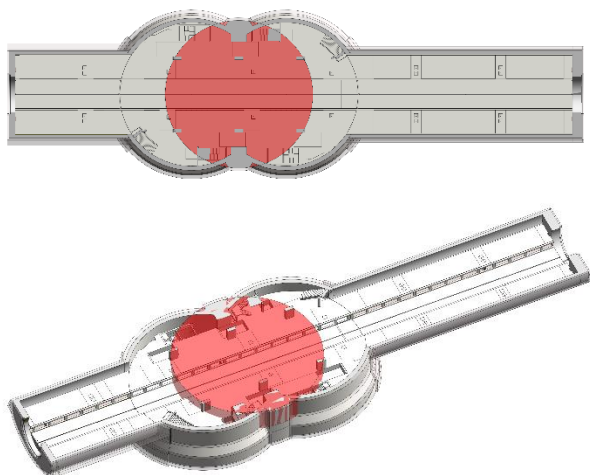


Figura 2. Vistas en planta e isométrica del pozo de la estación junto con el pozo de ataque en rojo.

El revestimiento secundario es de hormigón monolítico para las estructuras internas, con espesores que varían entre 60 cm, 80 cm y 100 cm. A él se unen los forjados formados por vigas y losas de hormigón armado. Estos suelos se apoyan en los muros del revestimiento secundario y en 6 pilares principales que se elevan desde el forjado inferior. La losa inferior funciona como base para todas las estructuras internas, el muro secundario y el edificio técnico.

Los pisos generalmente se elevan ejecutándose monolíticos con el revestimiento secundario. Pese a ello, y debido al paso de la tuneladora, el primer piso sobre la caverna de la estación (Mezanino, MEZD) y el nivel de Plataforma (PLAT) son ejecutados a posteriori del revestimiento secundario ya que deben permitir el paso de la TBM por la estación. Debido a esto, no quedan del todo monolíticos respecto a los secundarios lo que obliga, para el nivel MEZD disponer de nichos en los que las vigas llegan al secundario y una losa de piso desconectada del revestimiento, realizada con

junta seca. En cuanto a la plataforma, la conexión viga – revestimiento secundario se materializa mediante perforación y colocación con epoxi de armaduras y siendo losas desconectadas mediante junta seca. Los demás pisos serán hormigonados a lo largo del revestimiento secundario, por lo que son totalmente monolíticos.

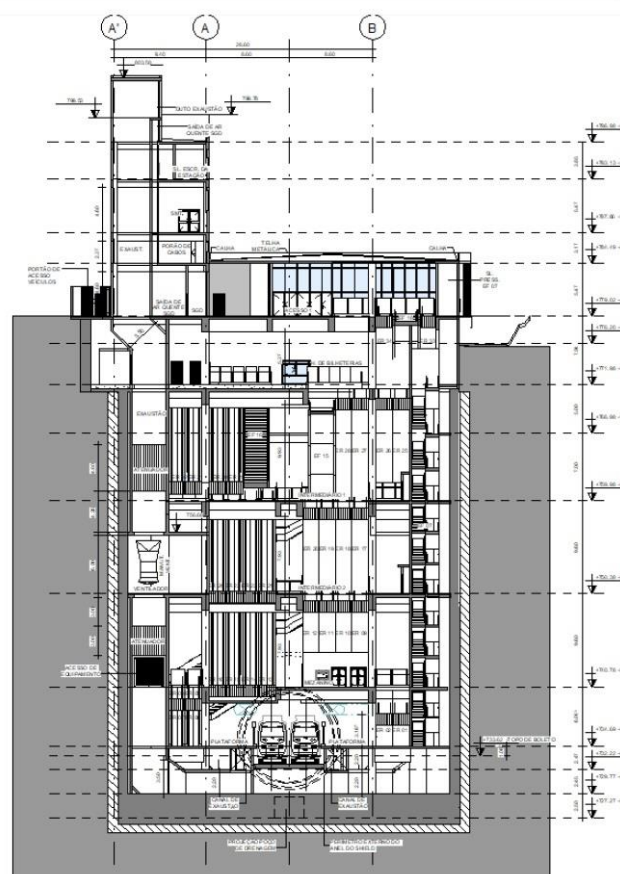
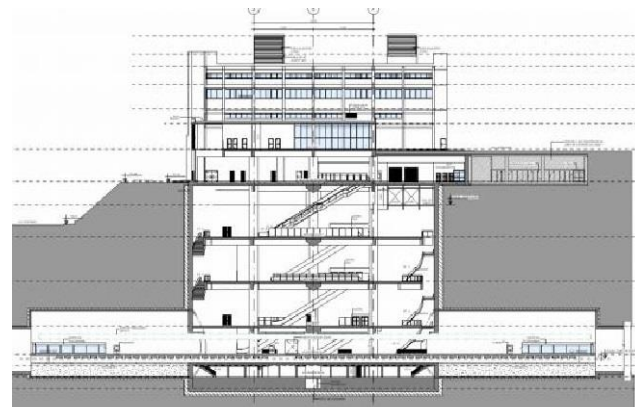


Figura 3. Cortes longitudinal y transversal.

A lo largo del presente documento se presentan las consideraciones y particularidades del método de construcción, el cual influye en el cálculo de la estructura de manera relevante.

2. Proceso constructivo

A continuación, se presenta el proceso constructivo, el cual se divide en tres etapas: dos primeras donde se prepara el emplazamiento para la ejecución material de la obra y una tercera etapa en la que se ejecuta la misma (en la cual se tiene especial énfasis en este documento).

2.1 Etapa 1 – Servicios afectados y desvío de tráfico

En una etapa inicial se detectaron los servicios afectados, se actualizó el catastro, se reubicaron las interferencias de servicios afectados iniciales y se implantó la zona de obra. Así mismo, se ejecutaron los desvíos de obra y las modificaciones pertinentes a la señalización viaria.

2.2 Etapa 2 – Contenciones, movimiento de tierras e instrumentación

Debido a la diferencia de cota existente en el área, es preciso, inicialmente, establecer una plataforma de trabajo; lo que obligó, en esta segunda etapa, a ejecutar unas contenciones auxiliares, así como todo el movimiento de tierras necesario para adecuar la zona a la cota prevista. Asimismo, se implementó el sistema de instrumentación que controla la excavación de la estación y mide las afecciones en superficie.

2.3 Etapa 3 – Ejecución del pozo

La ejecución del pozo de la estación se puede dividir en cuatro frentes de trabajo bien diferenciados: la ejecución del pozo de ataque y el pórtico de alargamiento (A), la ejecución del pozo principal de la estación con forma de cacahuete (C) y la ejecución de los túneles que forman el cuerpo de la estación (B y D).

2.3.1. Frente A – Pozo de ataque y pórtico

Se ejecutó inicialmente la viga de coronación (A1) del pozo de ataque (central) para,

posteriormente, comenzar con la excavación y construcción del pozo de ataque (A2). Para esto se comenzó excavando la zona central dejando bermas sin excavar, posteriormente se excavaron las bermas de manera alternada y se procedió a ejecutar el revestimiento primario en cada una de ellas (damas) mediante hormigón proyectado y mallas electrosoldadas a pasos de avance de 1,50 m; simultáneamente a la activación del sistema de rebaje del nivel freático alrededor de la huella del pozo con forma de cacahuete, lo que drenará el agua alrededor del pozo de ataque permitiendo diseñar el primario solo para los empujes del suelo.

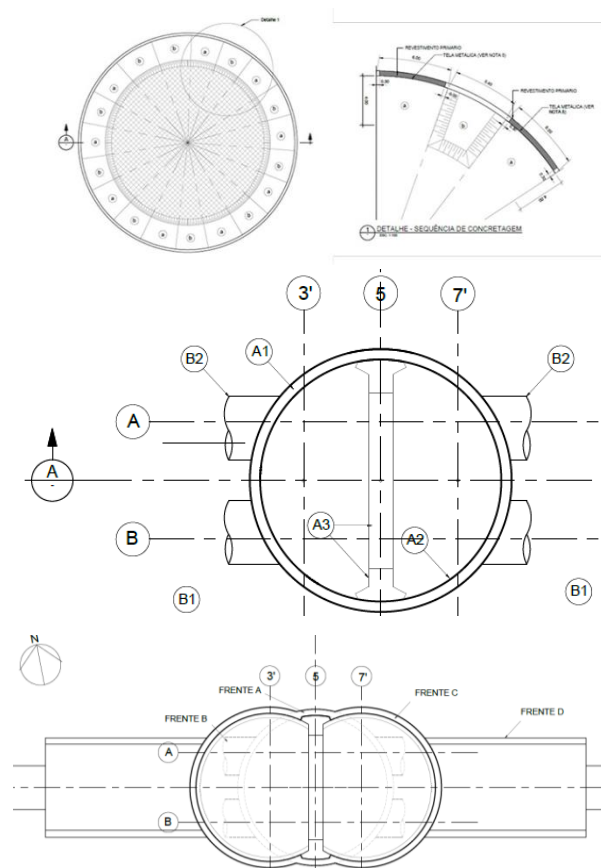


Figura 4. Esquema etapa 3, fase inicial.

El revestimiento primario presenta espesores variables entre 0,25 m en los primeros 12 m, pasando a 0,40 m en los siguientes 15 m. El resto del pozo, hasta los 52 finales, presenta un espesor del primario de 0,60 m.

Una vez excavado el pozo y proyectado el revestimiento primario que sostiene los empujes del suelo, se procede a ejecutar la primera fase de la losa de fondo, correspondiente con la viga

inferior que sirve de apoyo y equilibra el pórtico (A3). A la vez que se instala el respectivo sistema de impermeabilización.

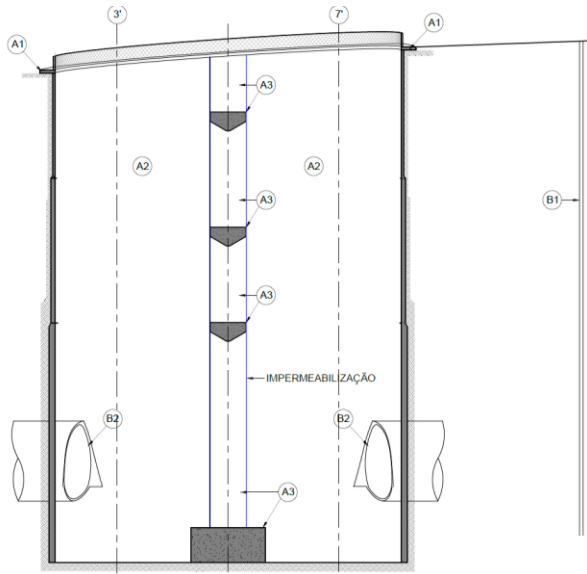


Figura 5. Frente A, fase inicial (corte A).

A continuación, se ejecutan los pilares principales a ambos lados del pórtico, junto con el sistema de impermeabilización localizado. Estos son apuntalados gracias a las vigas estampidor del pórtico, que son ejecutadas en altura conforme avanzan los pilares y son cimbradas una encima de la anterior.

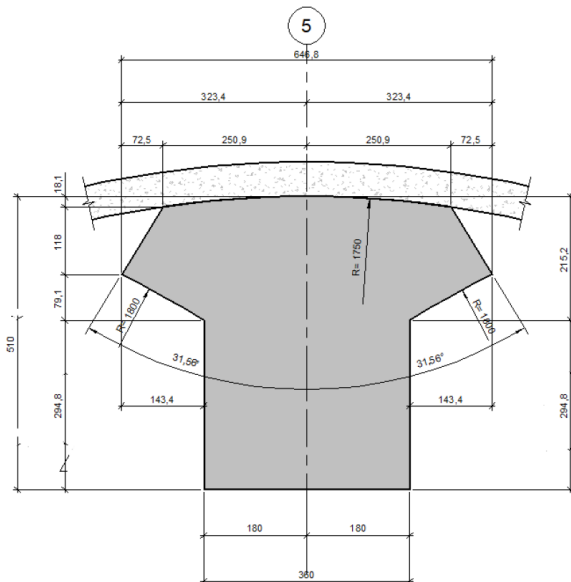


Figura 6. Sección de los pilares del pórtico.

Como puede apreciarse en la Figuras 4 y 6, el diseño definitivo de la estructura presenta el pilar de intersección como una región de

intersección de los pozos secantes, aprovechando parcialmente el primer pozo de ataque (provisional). De esta forma, el pórtico queda finalmente ejecutado, tal y como se presenta en las Figuras de la 6 a la 9, con los pilares laterales y las 4 vigas estampidor (una de ellas la inferior, correspondiente a la ejecución parcial de la losa de fondo en la sección central del pozo de ataque).

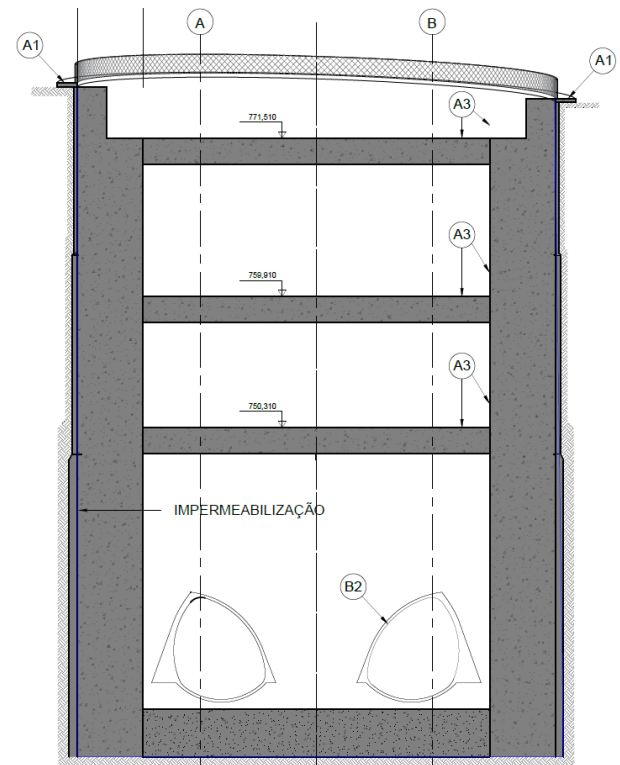


Figura 7. Frente A, fase inicial (corte B).

2.3.2. Frente C – Pozo principal de la estación

A continuación, se inicia la ejecución del pozo principal o de alargamiento. Comienza con el inicio de la segunda etapa de movimiento de tierras (C1) y la ejecución de la viga de coronamiento del pozo de alargamiento (C2), para posteriormente iniciar la excavación del pozo de alargamiento de manera simultánea a la demolición de la pared primaria de intersección del pozo de ataque (C3). Esta excavación se realiza de manera simétrica en ambos lados y finaliza con la ejecución de las contenciones mediante hormigón proyectado en todos los límites externos del terreno (revestimiento primario con forma de cacahuete).



Figura 8. Ejecución de los pilares del pórtico.

En este punto y como se puede apreciar en la Figura 4 (inferior), el revestimiento primario apoya contra el pórtico de alargamiento el cual permite que dicho revestimiento continúe trabajando por forma (trabaja completamente comprimido).

Con el pozo completamente excavado, se ejecuta la segunda fase de la losa de fondo, de manera que quede finalizada en su totalidad. Acto seguido y mediante encofrado trepante, se ejecuta el revestimiento secundario del pozo.

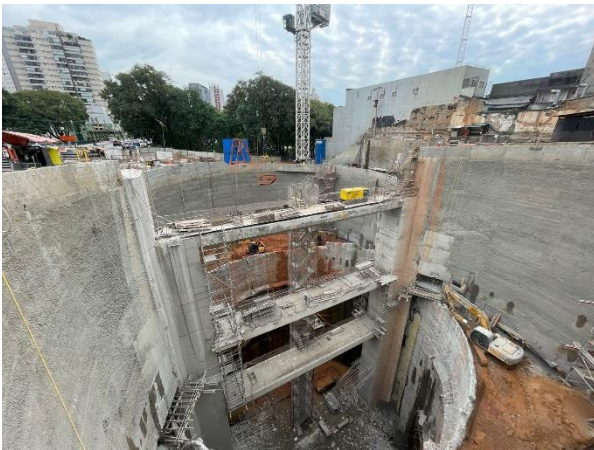


Figura 9. Excavación del pozo principal.

2.3.3. Frentes B y D – Túneles de la estación

Durante la fase de excavación del pozo de alargamiento, se ejecutan los tratamientos internos de los sides drifts para poder viabilizar la demolición y avance de las labores de excavación y proyección del revestimiento primario (D1) de la caverna de la estación. Tras llegar al fondo del pozo con la excavación y

ejecución de la losa de fondo, se ejecutan los emboques del futuro túnel de la estación (D2).

La excavación de la caverna de la estación se realiza faseada debido a las grandes dimensiones que presenta. De esta manera primero se ejecutan los sides drifts laterales, para continuar con la bóveda que une ambos side drives, concluyendo con la contrabóveda, que se realiza en dos fases de excavación. A continuación, se coloca la impermeabilización de los túneles (D4) y, finalmente, se ejecuta el revestimiento secundario en dos fases (D5). En una primera se ejecutan la losa inferior y los hastiales del túnel, en una fase final y mediante carro de encofrado se ejecuta la sección en arco superior.

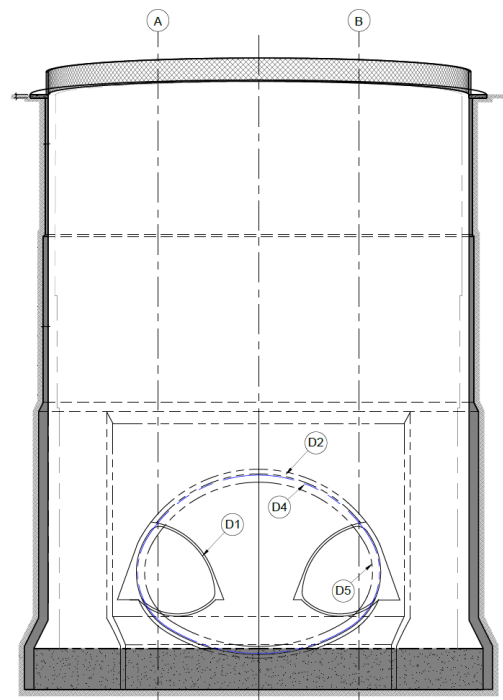


Figura 10. Frente D, fase final (corte B).

2.4 Auscultación

Para el control de la ejecución de la obra se realizaron mediciones de convergencia en el interior del pozo cada 6 m y control de asentos en estas mismas secciones y en el exterior del pozo. De la misma manera se realizó un control exhaustivo de la piezometría, lo que permitió, al cruzar ambos datos, optimizar los pozos de bombeo inicialmente previstos en entorno de la estación.

3. Diseño estructural

3.1 Bases de diseño

3.1.1. Acciones consideradas

Las principales acciones para considerar durante la fase constructiva del pozo son los empujes del suelo y del agua. El agua es drenada durante las fases transitorias de construcción y entra en escena en el momento en que el revestimiento secundario es ejecutado al completo, ya que está dimensionado para soportar los esfuerzos pertinentes. En este caso, la losa de fondo continúa siendo drenada ya que la subpresión continúa siendo mayor que el peso de la estación y el rozamiento de la cuña de suelo alrededor del pozo (que también debe ser vencida por la subpresión para “levantar” el pozo). Hay que tener en cuenta que este drenaje de agua se mantiene hasta que se ejecutan todas las estructuras internas del pozo y la verificación de flotabilidad queda validada.

3.1.2. Modelado

Las leyes de empujes de suelo introducidas en los modelos estructurales de cálculo provienen de modelos geotécnicos realizados previamente, donde se modelizan las capas de suelo y las rigideces de los elementos resistentes; revestimientos primarios (hormigón proyectado para resistir las presiones del suelo) y secundarios (estructura definitiva que resiste los empujes del suelo y agua freática).

Son realizados tres modelos estructurales de cálculo simulando las tres situaciones que son dimensionantes, los cuales son comentados a continuación. En esos modelos para el diseño de la estructura definitiva, se implementa un análisis de sensibilidad del comportamiento del revestimiento secundario antes empujes del suelo no simétricos, para tener en cuenta que el terreno no es realmente homogéneo alrededor del pozo

3.2 Fases diferenciadas en el análisis estructural

La estructura de pórtico tiene la función de equilibrar el pozo de la estación desde la etapa de ejecución del revestimiento primario proyectado, durante la apertura de los pozos laterales, hasta el estado final de la estructura, cuando el pórtico funciona como puntal horizontal de los pozos y como soporte para los pisos de operación de la estación. Por tanto, su verificación consta de diferentes fases de carga y características geométricas. Para ello, se definieron tres fases para su verificación estructural.

3.1.2. Fase 1 inicial

Pórtico aislado, sin estructura interna aún construida, que recibe las cargas del revestimiento primario de los pozos permanentes. En este momento, sólo hay presión activa sobre el suelo, con el descenso activado del nivel freático. Debido al paso de la tuneladora, aún no se construye la viga de viga a nivel de entresuelo (Vest.2, ver Figura 14), ni se realiza aún la losa de fondo completa; sólo se hormigonará la sección central de la losa de fondo para poder materializar una viga inferior y equilibrar la base del pórtico.

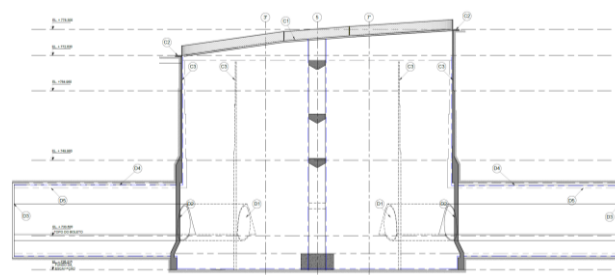


Figura 11. Vista esquemática de la fase 1 del pórtico en la etapa 3 del proceso constructivo. Estructura del pórtico sin losa de fondo (solo la viga inferior) y con el revestimiento primario ejecutado (sin revestimiento secundario).

3.2.2. Fase 2 intermedia

Pórtico trabajando en conjunto con las estructuras secundarias, losa inferior y pisos intermedios. En este momento aún no se

construye el entrepiso por interferencia en el paso de la tuneladora por el interior de la estación. El descenso del nivel freático se desactiva, por lo que habrá empujes activos de suelo y agua. Pese a ello, como la estación aún no tendrá el peso suficiente para combatir la flotabilidad, la losa inferior se mantendrá drenada, evitando esfuerzos de subpresión. La presión del suelo estará actuando sobre el primario y este descargará en el pórtico, mientras que el agua ya estará cargando el pórtico de alargamiento a través del revestimiento secundario.

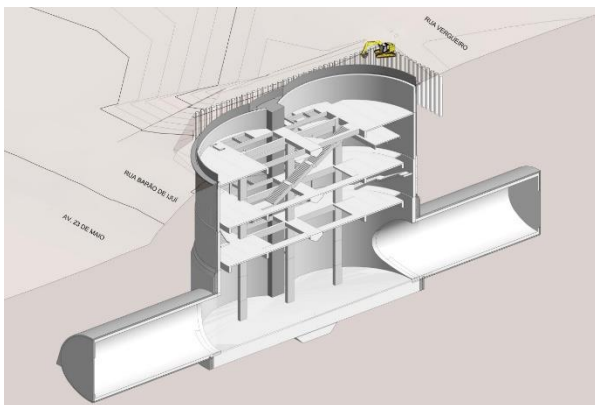


Figura 12. Vista esquemática de la fase 2 del pórtico.

Para el empuje hidrostático, son aplicadas las siguientes consideraciones:

- Como la estructura aún no tiene suficiente peso para combatir la subpresión, la losa inferior debe permanecer drenada, por lo que la carga de agua solo induce presiones laterales, no generando subpresión (o empuje vertical).

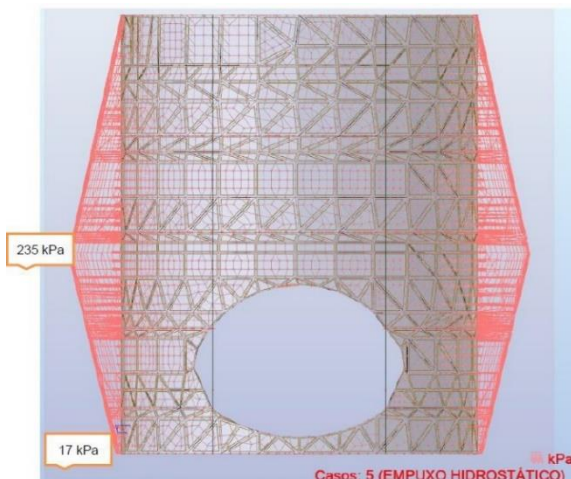


Figura 13. Empuje hidrostático.

- Al permanecer el fondo drenado, la presión hidrostática pasa a cero en la unión de la losa del fondo con la secundaria, generándose el siguiente diagrama de presiones decreciente en la base del revestimiento secundario.

3.2.3. Fase 3 final

Fase final con toda la estructura construida, incluido el entrepiso inferior faltante, y la presión del suelo “transferida” al secundario, así como la presión hidrostática actuando sobre el secundario, ya con aporte de la viga Vest.2 del nivel inferior

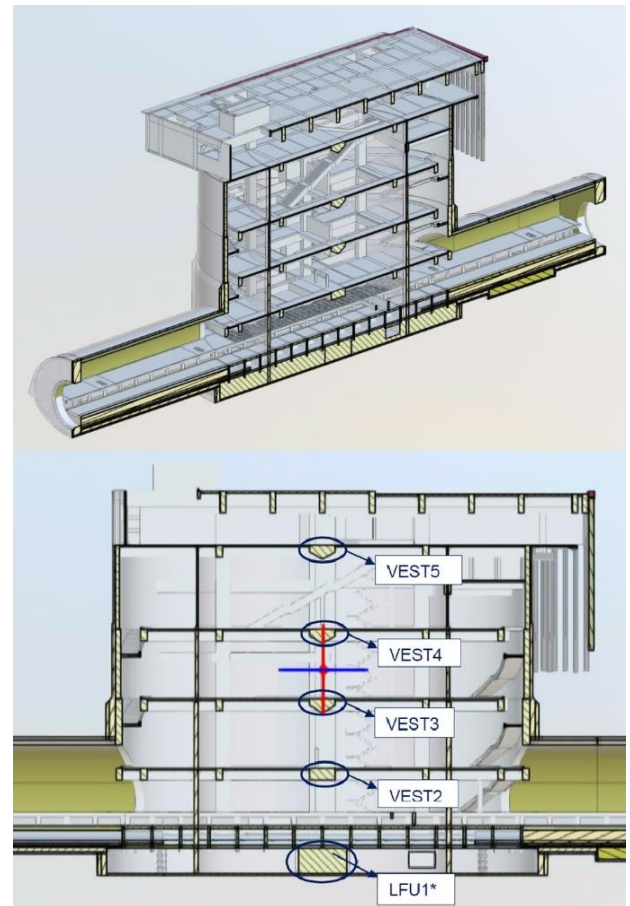


Figura 14. Vista esquemática de la fase final.

La estructura en estudio fue modelada computacionalmente mediante un modelo numérico basado en FEM (Método de Elementos Finitos), elaborado por elementos viga, placa y apoyos con muelles equivalentes para la interacción suelo/estructura. Esta fase es equivalente a la estructura en la fase final de construcción.

3.3 Pórtico de alargamiento y estructura definitiva

3.3.1. Pórtico de alargamiento

El procesamiento de los modelos de cálculo FEM de la estructura es realizado con la teoría de no linealidad, considerando la no linealidad geométrica por P-Delta y la no linealidad de la rigidez de la estructura por la teoría de grandes desplazamientos.

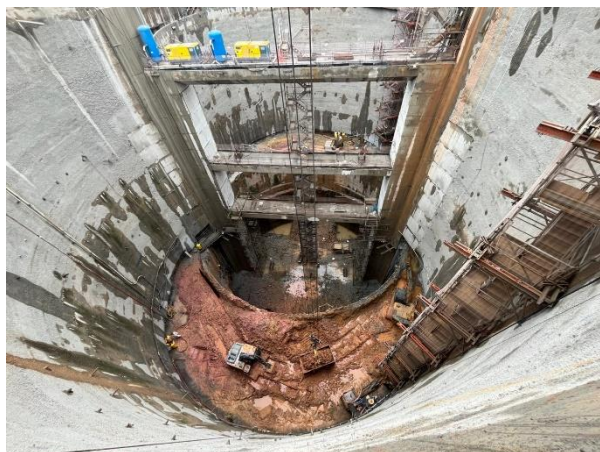


Figura 15. Pórtico de alargamiento.

El análisis P-Delta tiene en cuenta efectos de segundo orden, como el cambio en la rigidez a la flexión en función de las fuerzas longitudinales y la influencia de la deformación de la estructura en el estado de equilibrio final. Los grandes desplazamientos tienen en cuenta efectos de segundo y tercer orden, como la rigidez lateral adicional resultante de la deformación y la influencia de la curvatura en el alargamiento del elemento.

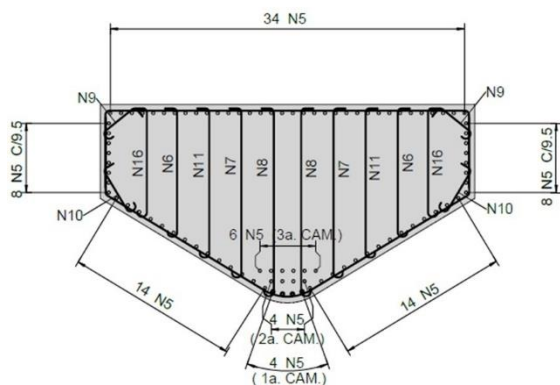


Figura 16. Sección transversal armada de viga estampador tipo.

Son comprobados los soportes en una determinada situación transitoria (o constructiva), con las respectivas combinaciones. Incluso para condiciones provisionales, son tenidos en cuenta efectos de segundo orden con esfuerzos obtenidos en análisis P-Delta y grandes desplazamientos (segundo orden global y local).

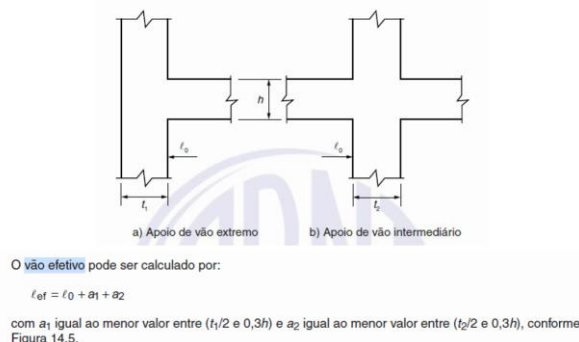


Figura 17. Vanos efectivos conforme la NBR 6118.

Para obtener los esfuerzos de dimensionamiento es tenido en cuenta que, aunque el modelo de cálculo es elaborado por el eje de los elementos, sin embargo, los esfuerzos flectores fueron obtenidos a una distancia de 0.3 veces el canto de los elementos, conforme ítem 14.6.2.4 – vanos efectivos de vigas – de la NBR6118 [2]. Esta consideración es utilizada debido a las grandes dimensiones de los elementos y sus impactos significativos en los esfuerzos de dimensionamiento.

3.3.2. Losa de fondo y revestimiento secundario

El diseño final de la estructura presenta una losa inferior incorporada al pórtico principal de la estación, que está diseñada con parte de la losa inferior que actuará como viga de soporte en las fases preliminares de construcción.

La losa presenta una sección de altura constante de 3.50 m, cuyos cantos se solidarizan con el pilar del pórtico de alargamiento y el muro del revestimiento secundario en todo el perímetro, con una reducción de sección a lo largo de la altura de ese revestimiento (60 cm, 80 cm, 100 cm y 220 cm en la base).

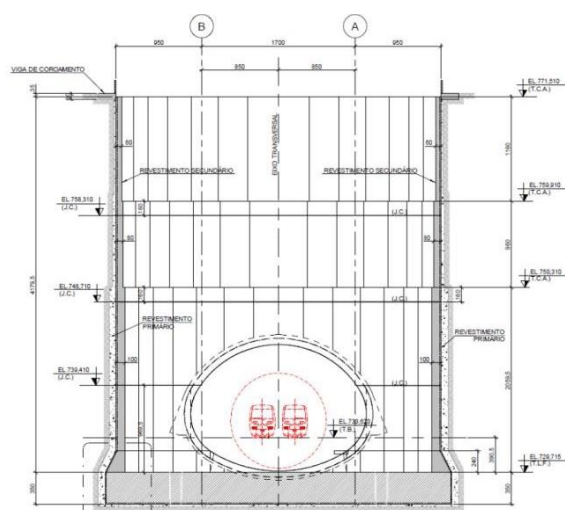


Figura 18. Estructura definitiva. Revestimiento secundario del pozo de la estación.

4. Conclusiones

La solución de pozos secantes implementada en la estación de São Joaquim ha permitido resolver de manera eficaz una serie de circunstancias que la convertían en especialmente compleja.

La solución mediante pozos secantes permitió la implementación de los elementos de transporte vertical (escaleras) que la estación precisa para dar servicio a una demanda elevada unido a la dificultad del poco terreno disponible. Asimismo, la solución mediante pozos, unida al adecuado diseño de un sistema de drenaje que permita ejecutar el pozo sin tener en consideración los efectos del empuje hidrostático hasta fase definitiva, conlleva una optimización de materiales significativa.

De la misma manera que la geometría circular planteada permite optimizaciones al hacer trabajar a la estructura por forma, lo que lleva a ahorros de material significativos con respecto a otras tipologías (ya que es la forma circular y un estado de carga isotrópico lo que ayuda a evitar la aparición de flexiones y el trabajo a compresión del sostenimiento, como ocurre con otras tantas excavaciones circulares realizadas al abrigo de pantallas continuas o de pilotes secantes), hay que añadir que sus dos principales desventajas no permiten la utilización de esta tipología en numerosos casos; a) mayor

área de ocupación y volumen de excavación para un área de trabajo útil similar al obtenido con excavaciones rectangulares; b) frente de ataque de excavación del túnel o galerías circular que dificulta el inicio de la excavación.



Figura 19. Vista aérea de la Estación de São Joaquim en fase de ejecución del pozo de alargamiento y demolición del pozo de ataque.

Agradecimientos

Agradecemos al equipo de la ingeniería de diseño PROMON Engenharia, responsable de los cálculos estructurales y la elaboración de los proyectos por el apoyo prestado en el desarrollo de las soluciones de diseño; así como a los equipos de Ingeniería y Construcción de ACCIONA de la Línea 6 de Metro de São Paulo.

Referencias

- [1] Sotiris, K. (2023, 25 de agosto). *‘Caterpillar’ shaft saves carbon and space on HS2’s west London site*. New Civil Engineer. <https://www.newcivilengineer.com/innovative-thinking/caterpillar-shaft-saves-carbon-and-space-on-hs2s-west-london-site-25-08-2023/>.
- [2] Comitê Brasileiro da Construção Civil (2007), *Projecto de Estructuras de Hormigón* NBR 6118:2023, Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [3] Scremin, A.K. Santos, C.B. Ferreira, G.M.M. & Robles, V.M. (2025) *“Inovação e Engenharia: o caso da Estação FAAP-Pacaembu”*. 6º CBT, São Paulo.