

Modificación de proceso constructivo de estación subterránea Metro Lima (Perú) para paso acelerado de tuneladora en vacío

Modification of the construction process for an underground station of the Lima Metro (Peru) to allow accelerated passage of a tunnel boring machine

Vicente Vicent Velasco^a, Luis Armando Frías Cerdá^b y José Martín Romero^c

^a Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Ayesa. Director de Proyectos. jvicent@ayesa.com

^b Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Ayesa. Jefe de Departamento de Estructuras. lafrias@ayesa.com

^c Ingeniero Industrial. Ayesa. Jefe de Proyectos de Estructuras. jmartin@ayesa.com

RESUMEN

En 2023, durante la elaboración del proyecto de construcción de la Línea 2 del Metro de Lima (Perú), el equipo de diseño se enfrentó al desafío de minimizar los tiempos de parada de la tuneladora (TBM) encargada de excavar el túnel entre las estaciones E-19 San Juan de Dios y E-04 Insurgentes, para cumplir con los requisitos de plazos exigidos por el contrato. Para lograrlo, se propuso modificar el diseño de la estación E-16 28 de Julio, acelerando su construcción para permitir el paso de la TBM según lo estipulado en el contrato y reducir así el tiempo de parada.

ABSTRACT

In 2023, during the development of the construction project for Line 2 of the Lima Metro (Peru), the design team faced the challenge of minimizing downtime for the tunnel boring machine (TBM) responsible for excavating the tunnel between stations E-19 San Juan de Dios and E-04 Insurgentes to meet the contractual deadline requirements. To achieve this, a modification to the design of station E-16 28 de Julio was proposed, accelerating its construction to allow the TBM to pass through as stipulated in the contract, thereby reducing downtime.

PALABRAS CLAVE: proceso constructivo, taludes, estación subterránea, optimización obra.

KEYWORDS: construction process, slope stability, underground station, project optimization.

1. Introducción

La TBM1, encargada de ejecutar el túnel de la etapa 1B y parte de la etapa 2 entre las estaciones E-19 San Juan de Dios y E-4 Insurgentes de la Línea 2, se detuvo junto al testero de más PK de la estación E-16 28 de Julio. Esto se debió a las exigencias en las Especificaciones Técnicas Básicas y en el Proyecto Técnico del Contrato de

Concesión, que requerían que la TBM1 pasara en vacío por las estaciones.

El objetivo del estudio que a continuación se desarrolla, consistió en definir modificaciones puntuales al Proyecto de Obra Civil de la Estación E-16 28 de Julio (L2). aprobado el 11 de octubre de 2022. Estas modificaciones permitieron reducir el plazo de ejecución de la obra civil imprescindible para que la TBM1

podiera pasar en vacío, cumpliendo con las disposiciones del contrato.

Los cambios menores introducidos en el EDI aprobado incluyeron las siguientes acciones principales:

A. División del proceso constructivo “top-down” en dos subprocesos denominados A y B. El subproceso A comprendió la mínima obra civil necesaria para habilitar el paso en vacío de la TBM1, mientras que el subproceso B abarcó la ejecución del resto de la obra civil no imprescindible para dicho paso. Ambos subprocesos se diseñaron para simultanearse por niveles, aunque la priorización del subproceso A implicó un decalaje en la ejecución del subproceso B, que en algunos casos se realizó tras el paso en vacío de la TBM1.

B. Modificaciones parciales en las losas de cubierta, vestíbulo y fondo. Para acortar los plazos de ejecución, se modificaron zonas de las losas en el cuerpo principal de la estación, incrementando el número y tamaño de los huecos de ejecución en la cubierta y el vestíbulo, pero manteniendo su función arriostrante según el diseño aprobado. Esto permitió acelerar la excavación necesaria para construir únicamente la parte central de la losa de fondo, que incluía la cuna para el paso en vacío de la TBM1.

Como resultado, la implementación de estos ajustes al proyecto de obra civil permitió reducir significativamente el tiempo de parada de la TBM1 frente al testero de más PK de la estación. La definición y justificación de estas modificaciones se abordaron en dos estudios técnicos de Obra para analizar, en primer lugar, los subprocesos constructivos A y B, la geometría de las losas con los huecos de ejecución y las armaduras iniciales de la losa de cubierta. Los cambios restantes, relacionados con elementos estructurales adicionales, se detallaron en un segundo estudio debido a su ubicación posterior en el cronograma de obra.

2. Definición de fases para división de proceso constructivo.

Durante la etapa de post-diseño para adaptar la estructura al nuevo proceso constructivo se elaboró una descripción detallada de la división del proceso constructivo “top-down” del proyecto aprobado; subprocesos: A y B.

El subproceso A comprendió la parte del proceso constructivo general en la que se ejecutó la mínima obra civil de la estación que permitió el paso en vacío de la TBM1, según lo estipulado en el contrato. Por su parte, el subproceso B incluyó los procesos necesarios para ejecutar el resto de la obra civil que no era imprescindible para el paso en vacío de la TBM1, por lo que se ejecutó posteriormente.

Ambos subprocesos, A y B, pudieron desarrollarse de manera simultánea por niveles, ya que resultaron de la división del proceso constructivo general “top-down” del Estudio de Definición de Ingeniería (EDI) aprobado. Sin embargo, la priorización de la ejecución del subproceso A para habilitar el paso en vacío de la TBM1 generó un cierto decalaje (demora) en la ejecución del subproceso B respecto al A, de modo que una parte (e incluso su totalidad) del subproceso B se llevó a cabo tras el paso en vacío de la TBM1.

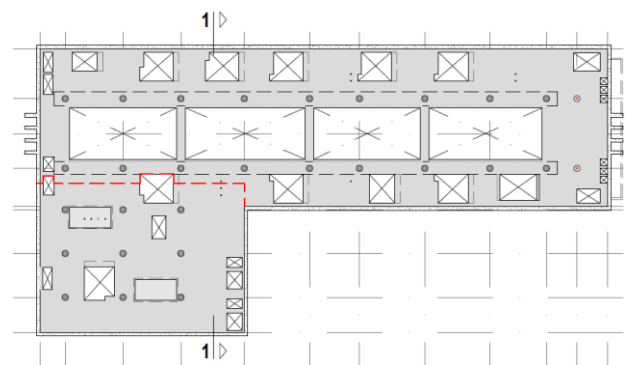
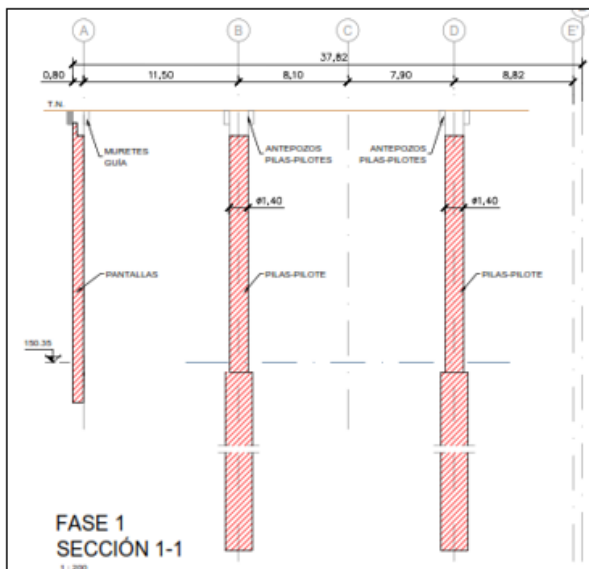


Figura 1. Planta General Estación E16 28 Julio con sección 1-1 para presentación de Proceso constructivo para subproceso A y B.



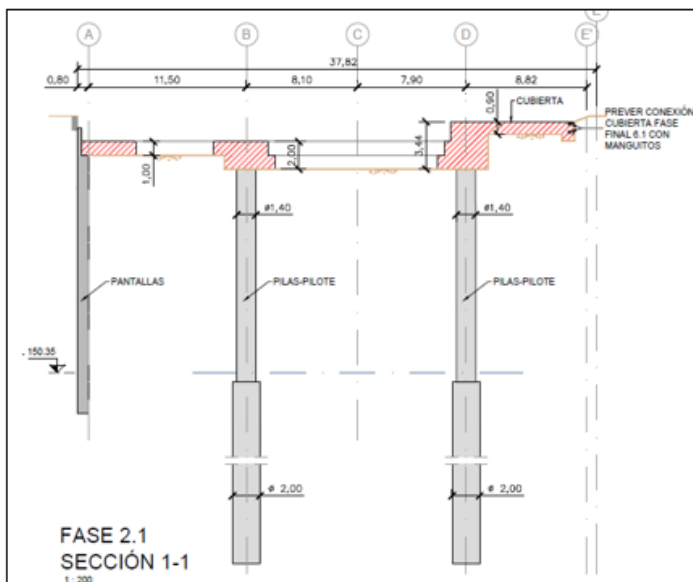
SUBPROCESO A: PRIORIZACIÓN PROCESO CONSTRUCTIVO PARA PASO EN VACÍO TBM1 (FASE 1 A FASE 5)

FASE 1.1:

PREPARACIÓN DEL TERRENO PARA GENERAR LA PLATAFORMA DE TRABAJO DESDE LA CUAL EJECUTAR LAS PANTALLAS Y MURETES GUÍA. LOS CUALES ESTÁN EJECUTADOS DESDE EL NIVEL DE TERRENO NATURAL.

FASE 1.2:

EJECUCIÓN DE PANTALLAS.
EJECUTAR ANTEPEZOS DE PILAS-PILOTE.
EJECUCIÓN DE LAS PILAS-PILOTE.

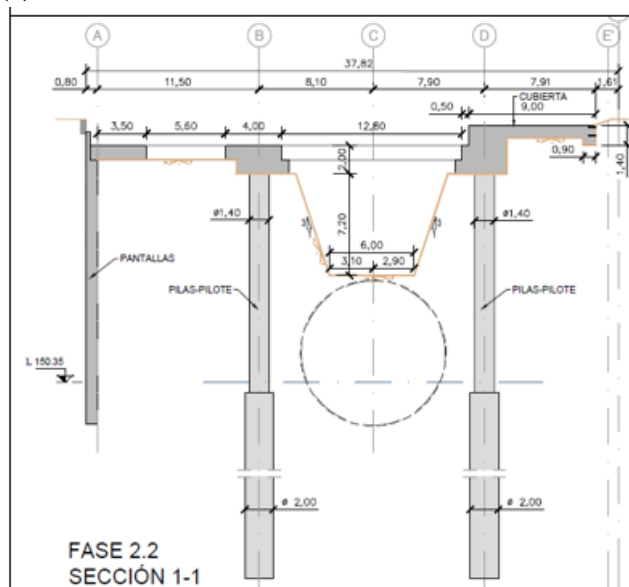


FASE 2.1:

EXCAVACIÓN HASTA LA CARA INFERIOR DE LA LOSA DE CUBIERTA Y POSTERIOR EJECUCIÓN DE LA MISMA. CONSIDERAR, PARA LAS VIGAS LONGITUDINALES DE LOS EJES B Y D, LA CARA INFERIOR DESCOLGADA COMO LA MÁXIMA COTA DE EXCAVACIÓN A EJECUTAR.

PREVER HUECOS PROVISIONALES PARA EJECUCIÓN DE EXCAVACIONES ACCELERADAS ENTRE ALINEACIONES 2 Y 8 Y ENTRE LA 8 Y 9.

EN LA ZONA DE SALIENTE ESTACION PARA EDIFICIO INTERCAMBIADOR L1-L2, PREVER TACÓN CORRIDO EN LA SECCIÓN DE LOSA CUBIERTA PARA GARANTIZAR ARRIOSTRAMIENTO TERRENO EN FASES POSTERIORES.



FASE 2.2:

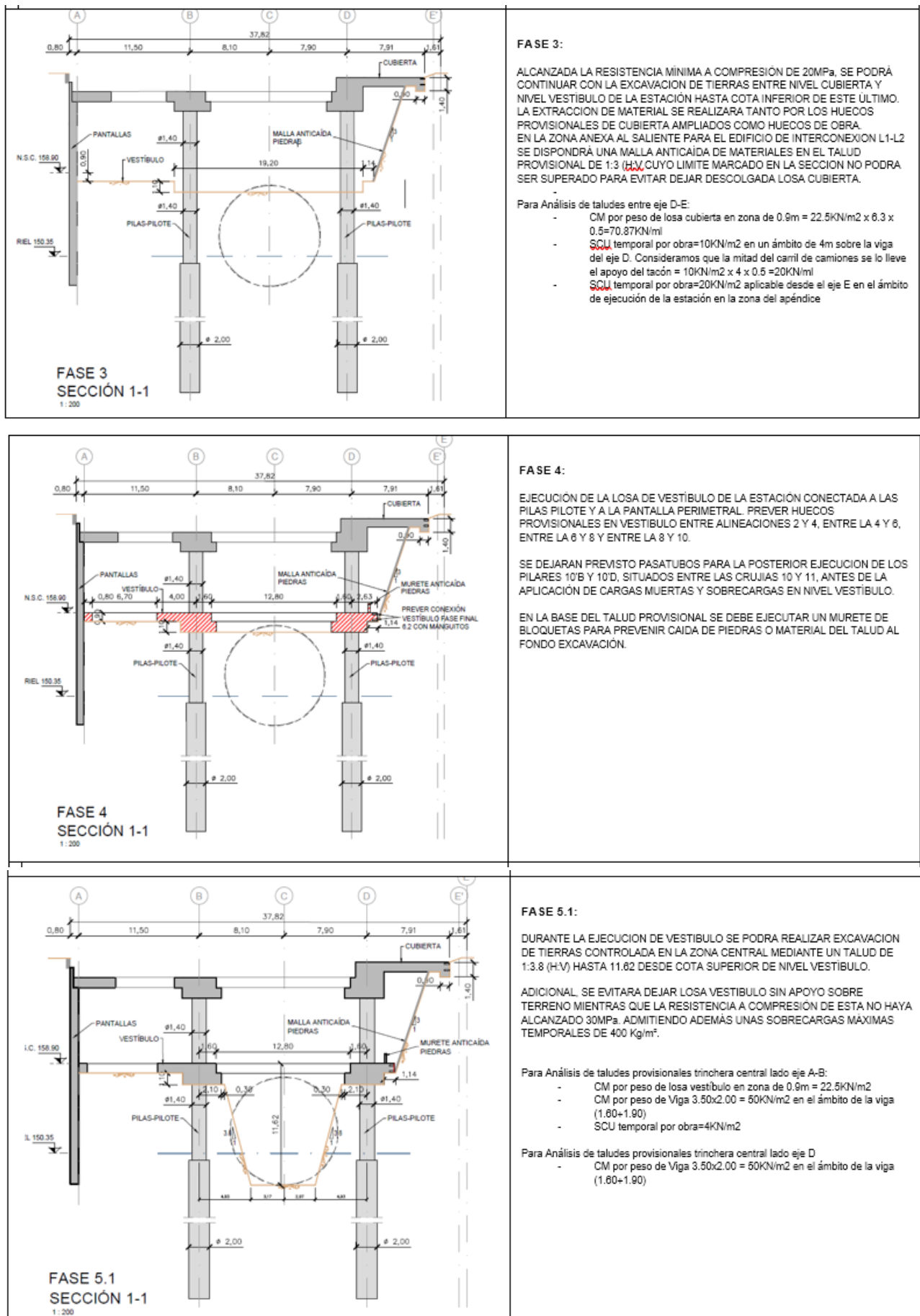
EXCAVACIÓN DE TIERRAS CONTROLADA EN LA ZONA CENTRAL MEDIANTE UN TALUD DE 1:3 (H/V) HASTA UNA PROFUNDIDAD MÁXIMA DE 9,20m DESDE CARA SUPERIOR LOSA CUBIERTA. ADICIONAL, SE EVITARÁ DEJAR LOSA CUBIERTA SIN APOYO SOBRE TERRENO MIENTRAS QUE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE ESTA NO HAYA ALCANZADO 20MPa. ADMITIENDO ADEMÁS UNAS SOBRECARGAS TEMPORALES DE 1000 Kg/m².

Para Análisis de taludes provisionales trinchera central lado eje A-B:

- CM por peso de losa cubierta en zona de 1,3m = 32,5KN/m²
- CM por peso de Viga 3,50x2,00 = 50KN/m² en el ámbito de la viga (1,60+1,90)
- **SCU** temporal por obra=10KN/m²

Para Análisis de taludes provisionales trinchera central lado eje D-E:

- CM por peso de losa cubierta en zona de 0,9m = 22,5KN/m²
- CM por peso de Viga 3,50x3,44 = 86KN/m² en el ámbito de la viga (1,60+1,90)
- **SCU** temporal por obra=10KN/m² en un ámbito de 4m sobre la viga del eje D



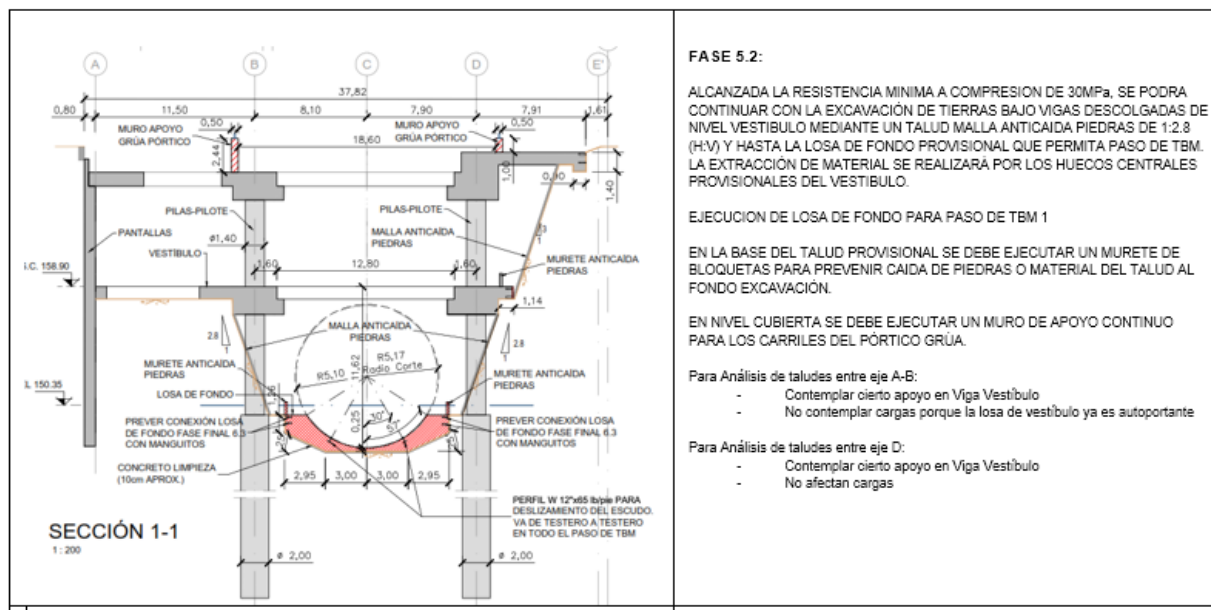
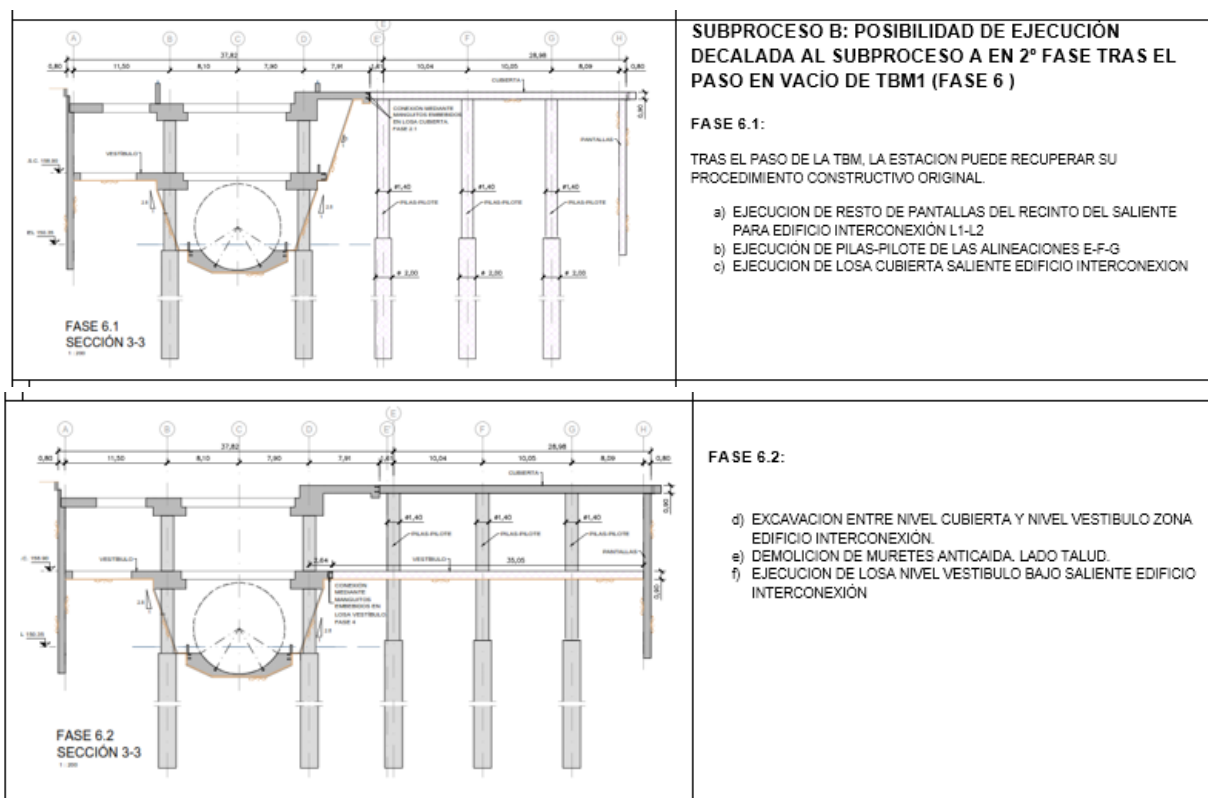


Figura 2. Proceso constructivo para subproceso A.



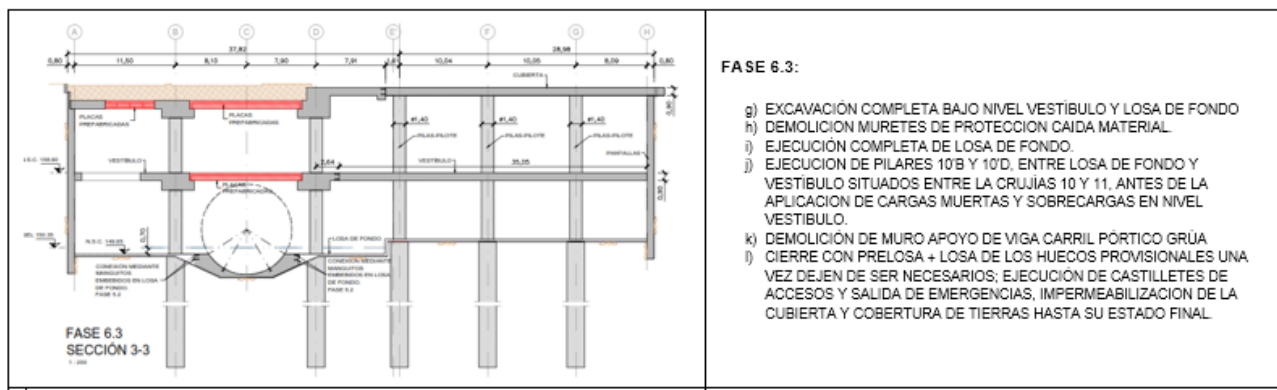


Figura 3. Proceso constructivo para subproceso B.

3. Análisis de estabilidad de taludes durante proceso constructivo

Con el objetivo de optimizar el proceso constructivo de la estación E16 "28 de Julio", correspondiente a la Línea 2, y permitir la ejecución temprana de la losa de fondo que actúa como cuna de paso para la tuneladora (TBM), se llevaron a cabo análisis de estabilidad de los taludes de excavación temporal mediante cálculos numéricos utilizando el software Plaxis 2D.

3.1. Fases de Diseño Modeladas en Plaxis 2D

El análisis estructuró el proceso en ocho fases constructivas principales, que se modelaron con precisión en Plaxis 2D para evaluar las condiciones de estabilidad y desplazamiento en cada etapa.

A continuación, se describen las fases coherentes con las fases descritas en el punto 2:

1. Fase "Ejecución Pantallas pilas & Cubierta":
2. Fase "Ejecución Talud Primero 1H:3V":
3. Fase "Excavación #1 Cubierta a Vestíbulo":
4. Fase "Ejecución Losa Vestíbulo":
5. Fase "Excavación en Talud 1H:3.8V"
6. Fase "Excavación #2 vestíbulo a losa de fondo":
7. Fase "Ejecución Cuna paso TBM":
8. Fase "Relleno":

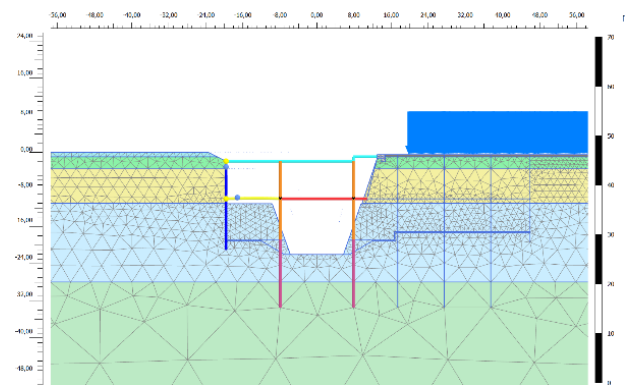


Figura 4. Modelo 2D Plaxis en Fase Final

3.2. Resultados del Análisis de Estabilidad

Los factores de seguridad obtenidos para los taludes de excavación temporales en las distintas fases superaron consistentemente el valor mínimo requerido de 1.33 [1], validando su estabilidad bajo las condiciones modeladas. A continuación, se detallan los principales resultados:

1. Talud 1H:3V (Endurecimiento de cubierta): Factor de seguridad: 1.630.
2. Talud 1H:3V (Excavación entre dintel y vestíbulo): Factor de seguridad: 1.342.
3. Talud 1H:3.8V (Excavación entre vestíbulo y losa): Factor de seguridad: 1.385.
4. Talud 1H:2.8V (Excavación final previa al paso de la TBM): Factor de seguridad: 1.421.

3.3. Resultados de Desplazamientos

El análisis también incluyó una evaluación de los desplazamientos máximos, tanto en la pantalla como en el terreno:

1. Desplazamiento horizontal máximo en la pantalla: 2.1 mm (muy inferior al límite de diseño de 10.5 mm).
2. Desplazamiento horizontal máximo en el terreno: 9.1 mm (también inferior al límite de 10.5 mm).

Estos resultados confirmaron que ambos parámetros cumplieron con los criterios de diseño establecidos, garantizando la viabilidad de las condiciones de obra en todas las fases constructivas.

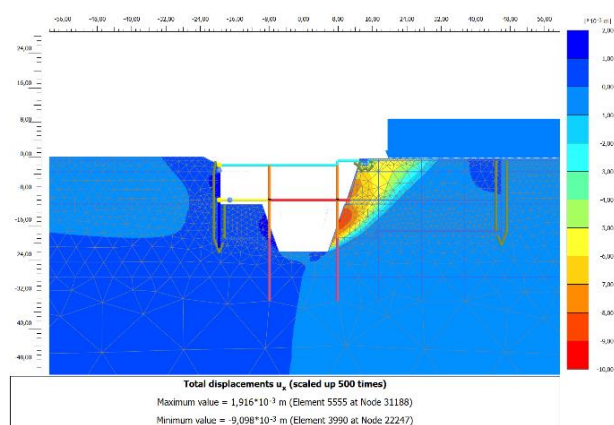


Figura 5. Resultado de Desplazamientos en fase final Modelo 2D Plaxis

El análisis realizado mediante Plaxis 2D [3] permitió asegurar la estabilidad de los taludes temporales en cada etapa del proceso constructivo, contribuyendo significativamente a la aceleración del proyecto y a la ejecución anticipada de la cuna de paso para la TBM.

4. Análisis de estabilidad global de estación.

Para verificar el comportamiento global de la estructura pantallas-losas y realizar un análisis preliminar de soluciones, se elaboraron modelos 3D globales de la Estación 28 Julio L2, , con el fin de evaluar y calibrar el comportamiento de la

fase provisional de ejecución de la estación sin apéndice para el edificio de interconexión:

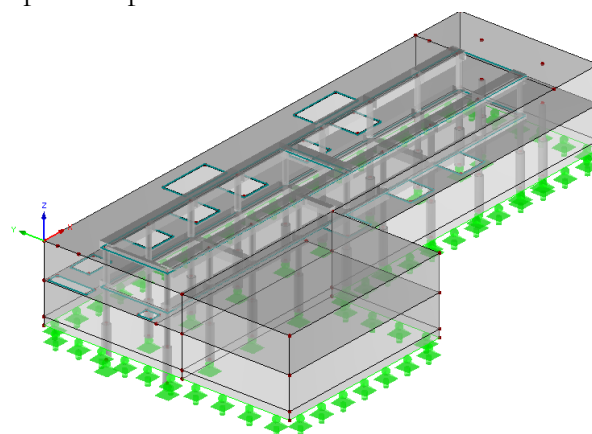


Figura 6. Modelo 3D FEM Estación Completa

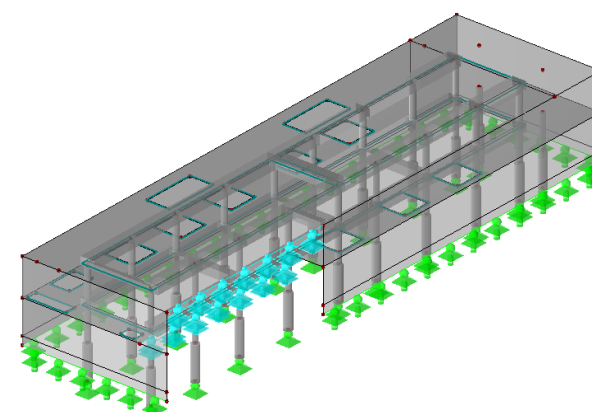


Figura 7. Estación Subproceso A (Sin Apéndice para Edificio)

Desde el punto de vista de la deformabilidad global de la estructura no se denotó un incremento significativo de desplazamientos, por lo que la subdivisión de procesos constructivos no plantea inconvenientes a la solución estructural global ni de pantallas ni de otros elementos principales como pilas pilote y losas de cubierta/vestíbulo.

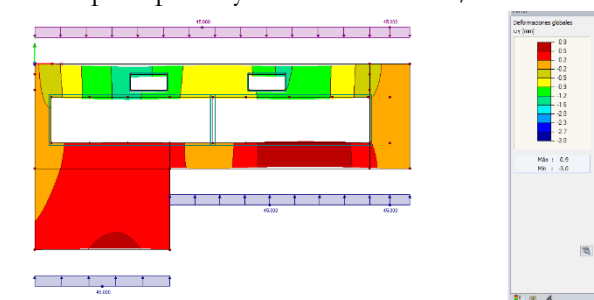


Figura 8. Deformaciones Horizontales Estación Global

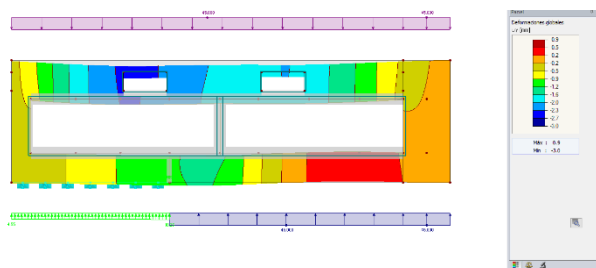


Figura 9. Deformaciones Horizontales Estación Subdividida (Subproceso A).

Las deformaciones acumuladas pasaron de 1.6 mm a 3.0 mm, pudiendo verificarse que la alteración del proceso constructivo no implicaría deformaciones adicionales acusadas en los elementos principales de la estación.

5. Análisis estructural de losa cubierta estación modificada.

Como parte de los ajustes requeridos en la división del proceso constructivo descrito en apartados anteriores, se han implementado cambios menores en la disposición de los huecos para obra en la losa de cubierta.

Tal como se observa en la Figura 9, en la zona central de dicha losa se han diseñado dos grandes aberturas con el objetivo de acelerar la excavación de las tierras contenidas en la estación. Estas aberturas, una vez completada su función, serán cubiertas mediante placas prefabricadas, siguiendo el mismo procedimiento aplicado previamente para cerrar los huecos de obra en configuraciones estructurales anteriores.

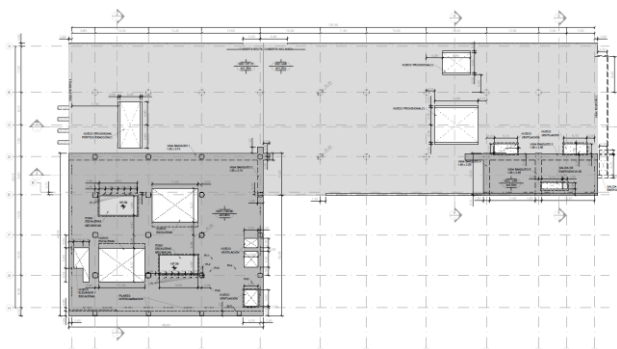


Figura 10. Planta losa cubierta (nivel calle) del proyecto original.

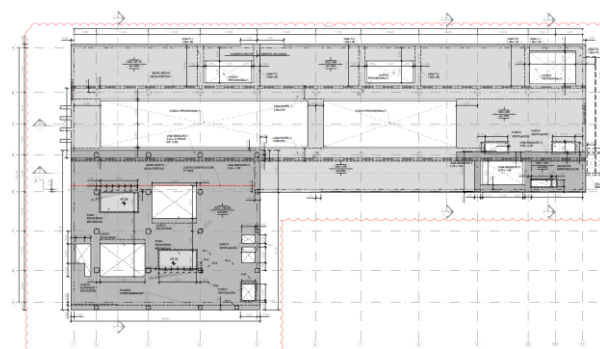


Figura 11. Planta losa cubierta (nivel calle) del proyecto para proceso constructivo acelerado.

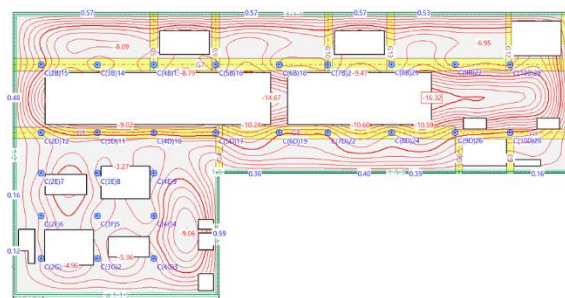


Figura 12. Análisis de deformaciones verticales de nueva losa de cubierta.

6. Verificación de integridad estructural de pilas estación durante fases constructivas.

El estudio consideró las pilas de las alineaciones B y D, evaluando su respuesta frente a las cargas inducidas por los taludes provisionales. Tras realizar el análisis, se concluyó que:

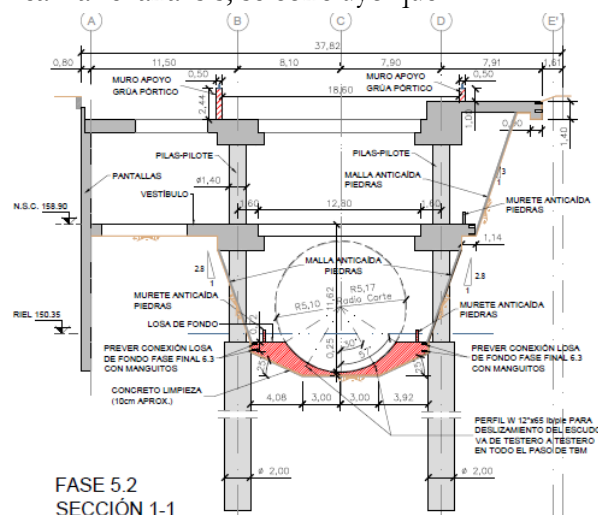


Figura 13. Sección tipo Estación con ejes B y D de Pilas principales analizadas.

Las pilas de la alineación B y las de la alineación D no presentaron sobreesfuerzos incompatibles con los refuerzos dispuestos para la situación final de servicio.

Los factores de aprovechamiento calculados para ambas alineaciones indicaron que las pilas operaban dentro de los límites admisibles, definidos por un factor de seguridad menor a 1.00.

Factores de Aprovechamiento Obtenidos:

- Pilas de la Alineación B: 0.32.
- Pilas de la Alineación D: 0.26.

Estos resultados confirmaron que las pilas disponían de un margen significativo de capacidad estructural frente a los efectos de los taludes provisionales.

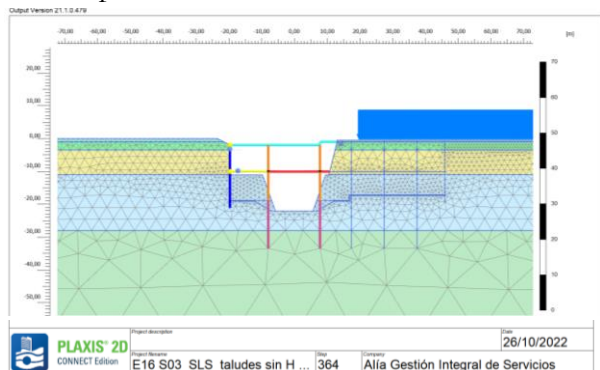


Figura 14. Análisis resultados 2D Plaxis para Pilas.

El análisis completo de la situación provisional de obra para las pilas de la estación, con especial énfasis en los posibles sobrepujes generados por los taludes de excavación, incluyó:

- Modelos de cálculo actualizados a la nueva situación estructural.
- Análisis de Diagramas de esfuerzos y desplazamientos.
- Justificaciones de la capacidad inicial del diseño estructural previo.

Los resultados obtenidos confirman la capacidad estructural de las pilas de la estación para soportar los sobrepujes generados por los taludes provisionales durante el subproceso constructivo A. La metodología empleada permitió asegurar la viabilidad técnica del diseño, ofreciendo un margen de seguridad adecuado para la transición hacia la etapa final de servicio de la estación.

7. Conclusiones

A lo largo del presente estudio, se evaluaron las modificaciones necesarias en el proceso constructivo de la estación E-16 "28 de Julio", correspondientes a la Línea 2, con el fin de habilitar el paso en vacío de la TBM1 y optimizar los plazos de ejecución. Estas modificaciones incluyeron ajustes en las fases constructivas, análisis geotécnicos y estructurales, y la implementación de medidas destinadas a garantizar la estabilidad y seguridad de la obra. A continuación, se presentan las principales conclusiones derivadas de este análisis:

A. Optimización del Proceso Constructivo.

La división del proceso constructivo "top-down" en dos subprocesos, A y B, permitió priorizar la ejecución de la obra civil mínima necesaria para el paso en vacío de la TBM1. Este enfoque resultó en una reducción significativa en el tiempo de detención de la tuneladora, asegurando el cumplimiento de los plazos estipulados en el contrato de concesión.

B. Análisis de Estabilidad Geotécnica.

Los análisis numéricos realizados con Plaxis 2D confirmaron la estabilidad de los taludes provisionales en todas las fases constructivas. Los factores de seguridad obtenidos, superiores a 1.33, y los desplazamientos máximos registrados, dentro de los límites de diseño, validaron la viabilidad técnica de las condiciones propuestas. Este análisis fue clave para garantizar la seguridad y viabilidad del proceso acelerado de excavación.

C. Comportamiento Estructural Global

La subdivisión del proceso constructivo no generó deformaciones significativas en la estructura global de la estación. Los análisis 3D confirmaron que las pantallas, pilas y losas principales mantenían su comportamiento estructural previsto, validando la eficacia de las modificaciones introducidas.

D. Modificaciones en las Losas de Cubierta

Las adaptaciones realizadas en las losas de cubierta, incluyendo la ampliación de huecos para excavación, facilitaron la aceleración del proceso constructivo sin comprometer la función estructural ni la seguridad del diseño original. Las soluciones propuestas, como el uso de placas prefabricadas para cerrar los huecos, demostraron ser prácticas y eficientes.

E. Verificación de Integridad Estructural de Pilas

El análisis detallado de las pilas de las alineaciones B y D confirmó su capacidad estructural para soportar los efectos de los taludes provisionales durante el subproceso constructivo A. Los factores de aprovechamiento obtenidos, muy inferiores a los límites admisibles, evidenciaron un amplio margen de seguridad.

F. Viabilidad Técnica y Aceleración del Proyecto

Los resultados del estudio integral demostraron que las modificaciones introducidas no solo fueron técnicamente viables, sino que contribuyeron a la optimización y aceleración del proceso constructivo. Esto permitió cumplir con los requisitos del contrato de concesión, reduciendo los tiempos de ejecución sin comprometer la seguridad ni la calidad del proyecto.

En conjunto, el enfoque adoptado para la estación E-16 "28 de Julio" de la Línea 2 resalta la importancia de la planificación técnica detallada y la flexibilidad en la ejecución, aspectos clave para enfrentar desafíos constructivos complejos en proyectos de infraestructura.

- [2] PLAXIS 2D/3D Reference Manuals (2024). *Guías detalladas para análisis avanzados de estabilidad de taludes utilizando elementos finitos.* Bentley Systems

Referencias

- [1] EUROCODE 7 (EN 1997-1). *Geotechnical Design – Part 1: General Rules*. Comisión Europea al Comité Europeo de Normalización (CEN)