

Ampliación de la Línea Azul del Metro de Estocolmo. Desde Kungsträdgården a Södermalm, Söderort y Nacka

*Extension of the Blue Line of the Stockholm Metro.
From Kungsträdgården to Södermalm, Söderort and Nacka*

José Manuel Duro Rodríguez ^a, Ana Oliva Canelo ^b, Carolina Fabián Antón ^c,
Sebastián Iglesias Carbonell ^d.

^a Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. TYPESA. Jefe de Sección. jmduro@typsa.es

^b Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. TYPESA. Jefe de Equipo. aoliva@typsa.es

^c Ingeniero Técnico de Obras Públicas. TYPESA. Jefe de Equipo. cfabian@typsa.es

^d Ingeniero Industrial. TYPESA. Jefe de Equipo. siglesias@typsa.es

RESUMEN

La ampliación de la Línea Azul hacia el sur y sureste de Estocolmo comenzó en 2014. Supone el diseño de once nuevos kilómetros de metro, siete nuevas estaciones subterráneas y las conexiones con dos existentes. La nueva estación de Sofía, a más de 100 metros de profundidad, presenta un acceso único alojado en una torre construida en el interior de la roca. En la estación existente de Gullmarsplan se aumenta la capacidad del intercambiador con un nuevo nivel de andenes. El proyecto incluye una amplia gama de estructuras, desde revestimientos de hormigón y falsos túneles, estructuras de edificación y otras ligeras de soporte a acabados arquitectónicos y de las instalaciones del metro.

ABSTRACT

The extension of the Blue Line to the south and south-west of Stockholm began in 2014. It involves the design of eleven new kilometres of metro line, with seven new underground stations and the connection to two ones. The new stations include Sofia, which is more than 100 metres underground and has a unique access housed in a tower built into the rock. Gullmarsplan increases the capacity of the existing interchange at this location with a new underground platform. The project also includes a wide range of structures, from concrete linings to cut-and-cover tunnels, not forgetting the lightweight structures to support the more aesthetic and architectural part of the metro.

PALABRAS CLAVE: metro, ferrocarril, estación subterránea, revestimiento, sostenibilidad, arte, BIM.

KEYWORDS: metro, railway, underground station, lining, sustainability, aesthetics, BIM.

1. Introducción

Estocolmo es una ciudad de contrastes. Posee un rico patrimonio histórico, patente en su arquitectura y museos, así como en el encanto medieval de su casco antiguo. También es moderna y urbana, con una combinación única de servicios urbanos y entornos naturales.

La ciudad está compuesta por numerosas islas que conforman un gran archipiélago que la rodea. El servicio de transporte público de Estocolmo es realmente eficiente, aunque para ello haya que salvar 57 puentes y conectar un total de 14 islas.

En este entorno, hay condiciones peculiares que contribuyen a explicar la importancia del transporte subterráneo en una ciudad así. Los rigores del largo y duro invierno sueco y el letargo que impone, sugieren la existencia de un palpitante mundo bajo tierra. El Metro de Estocolmo es mucho más que un simple medio de transporte. Es un símbolo de la ciudad y una parte importante de la vida cotidiana de sus habitantes.

2. La red de metro y la ampliación de la Línea Azul

Desde 1950, el metro da servicio a la ciudad y su área metropolitana, siendo un sistema de transporte que no existe en ninguna otra ciudad de Suecia. Actualmente, el metro cuenta con una extensión de 110 km y 100 estaciones, de las cuales 47 son subterráneas.

La actual ampliación contempla un nuevo segmento de la línea verde hacia el norte, desde Odenplan a Arenastaden (4,1 km de vía con 3 estaciones), la ampliación de línea azul hacia el norte, hasta Barkarby (4 km con 2 estaciones), la nueva línea amarilla entre Fridhemsplan y Älvsjö (8 km en TBM con 4 estaciones y recientemente adjudicada al consorcio TYPSTA/Ramboll) y también la línea azul hacia el sur y sureste, hasta Södermalm, Söderort y Nacka.

Este contrato, de 11,5 km de longitud, con siete nuevas estaciones y la conexión con dos existentes, fue adjudicado a TYPSTA y a su socio sueco Sweco. Con una inversión total estimada de 1.500 millones de euros, el proyecto se inició en octubre de 2014 y tiene prevista su finalización para el 2030.



Figura 1. Plano de la red de metro destacando la ampliación de Línea Azul hacia el sur y sureste.

Incluye la realización de los proyectos básicos y de licitación para la obra civil y la edificación y los diseños constructivos de algunas partes de la obra civil. También la supervisión de los distintos proyectos constructivos y del desarrollo de las obras, así como la coordinación general de la construcción.

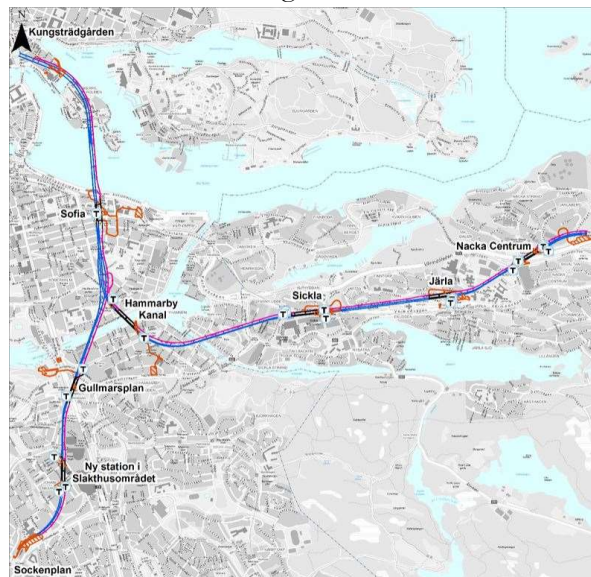


Figura 2. Ampliación de la línea azul hacia el sur y sureste de Estocolmo. Imagen: Region Stockholm.

3. Un recorrido por los túneles

El trazado del nuevo metro discurre por lecho rocoso, principalmente de granito y gneis, bajo un entrante del mar Báltico. El proceso de construcción de los túneles, cavernas y galerías es el tradicional *Drill&Blast*, combinado con inyecciones alrededor de la excavación para limitar las filtraciones de agua.



Figura 3. Ejecución de los túneles. Imagen: Region Stockholm.

3.1 Tapones

La ampliación de la línea, como se puede ver en las Figuras 1 y 2, se inicia en la estación existente de Kungsträdgården. Los túneles continúan hacia el sur, hasta la isla de Södermalm y la estación de Sofía. En su punto más profundo (ver Figura 12), los túneles se encuentran a 90 metros bajo la superficie del agua.

Para proteger la actual red de metro en el caso de que durante la construcción la roca de uno de los túneles se rompiera y el agua del mar inundara el sistema de túneles, se han diseñado dos barreras de hormigón en la conexión con el metro existente.



Figura 4. Vista aérea de Estocolmo y sus lagos.

De carácter temporal, estos tapones se demolerán una vez que la ampliación del metro esté completada.

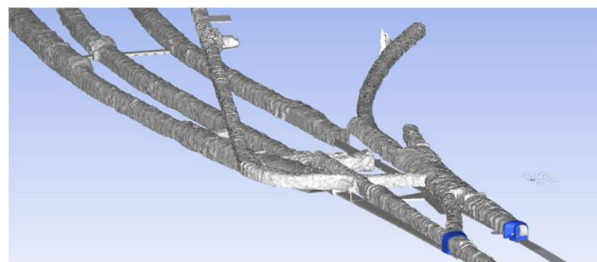


Figura 5. Red de túneles en Kungsträdgården y localización de los tapones (en azul).

Para estudiar el comportamiento del agua en la red de túneles se ha realizado un análisis mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD). Como peor escenario para una inundación se considera el derrumbe instantáneo de un área del mismo tamaño que la sección transversal del túnel ferroviario: $1300 \text{ m}^3/\text{s}$ de agua entrando y llenándolos. El análisis concluye que 180 segundos después del derrumbe se desarrolla la mayor presión en los tapones. El flujo procedente de los túneles ya no tiene adónde ir y se ve bruscamente desacelerado, ascendiendo y saliendo por los túneles de acceso con una gran aceleración. La fuerza estática inicial del agua sobre los tapones, de 38 metros, se ve incrementada hasta un valor de 115 metros, tres veces mayor, debido al comportamiento dinámico del fluido.

Con estas presiones, la forma más segura de diseñar los tapones es utilizar la roca como soporte. Para ello, la ubicación de las barreras se sitúa donde la sección del túnel presenta una forma troncocónica, con el extremo estrecho orientado aguas abajo.

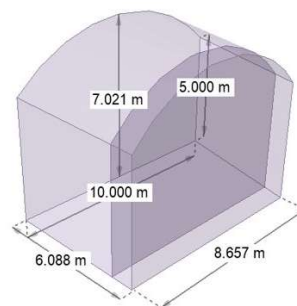


Figura 6. Dimensiones de uno de los tapones.

Cada tapón de hormigón se construye como una estructura monolítica, sin juntas transversales ni longitudinales, y se ejecuta en tres fases: primero el 50 % de la altura, después otro 35 %, y por último el 15 % restante. Aunque el volumen de los tapones es considerable (aprox. 500 m³), la secuencia de construcción propuesta, junto con la mezcla de hormigón elegida, evita el uso de sistemas de refrigeración de la masa. Adicionalmente, se garantiza la adherencia entre la estructura y la roca mediante inyecciones de contacto, las cuales se realizan en dos etapas, espaciadas meses en el tiempo.

3.2 Revestimientos

A lo largo de los 11.5 km de túneles se presentan algunas zonas con roca de mala calidad o en las que por las fisuras y fallas se producen infiltraciones de agua. También hay zonas del trazado en las que la cobertura de roca por encima de la sección de los túneles no es suficiente para soportar las cargas externas a las que éste se verá sometido. En estos lugares se han diseñado revestimientos de hormigón en el interior de la sección de roca.

Siguiendo con el trazado hacia el sur, la primera zona conflictiva se encuentra en Ladugårdslandsviken, con una columna de 60 m de agua y una cobertura de 8 m de roca por encima del túnel. Cercana a la anterior, el cruce bajo el Saltsjön, con más de 80 m de columna de agua y 20 m de cobertura de roca por encima del túnel, presenta similar problemática.

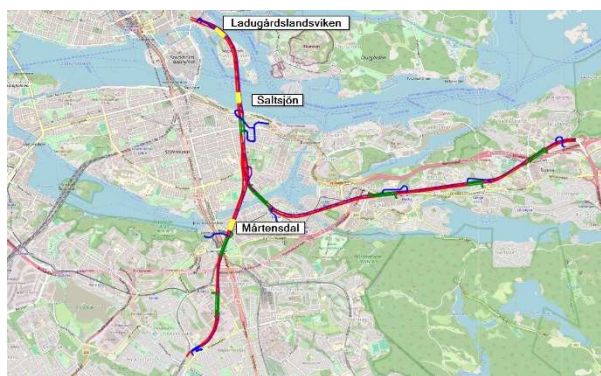


Figura 7. Localización de los revestimientos.

En ambas localizaciones se han diseñado revestimientos de 50 m de longitud. La dimensión libre interior se define atendiendo al uso para tráfico ferroviario de los túneles, eligiéndose una forma circular de 6.3 m de diámetro interior.

Actuando sobre la sección, destacan las presiones del agua y la de la roca que la rodea. El comportamiento estructural se analiza prácticamente mediante una sección 2D. Como resultado de los análisis, se concluye que con un espesor de 500 mm la sección queda comprimida en todo su contorno, y que el control de la fisuración determina la cantidad de armadura.

Atendiendo a otros requisitos, los revestimientos se diseñan para alcanzar un grado de permeabilidad clase 2, la cual permite ocasionales zonas húmedas aisladas, pero no gotas de agua. Para no desviar las corrientes subterráneas, se diseña un sistema de drenaje tipo “barrera”, el cual mantiene la cabeza de agua y su desplazamiento en la roca, mediante un sistema flexible, compuesto por una doble membrana polimérica impermeabilizante de 3+2 mm, protegida del hormigón proyectado mediante un geotextil.

El tercer revestimiento se encuentra cerca de la estación de Gullmarsplan. Allí los túneles discurren por una depresión de la roca en la que la cobertura mínima es de sólo 3 m y su calidad bastante pobre. Por encima de esa fina capa de roca se encuentran 35 m de cobertura de gravas y arenas con un gran caudal de agua. Adicionalmente, el lugar se encuentra bajo un puente ferroviario, cuyas cimentaciones profundas atraviesan las gravas hasta alcanzar la superficie de la roca.

Con esta casuística, utilizar el procedimiento normal de voladura probablemente produciría inestabilidad en la cubierta rocosa, podría romperse, desprenderse y originar que una gran afluencia de agua y tierra, invadir los túneles, y ponerse en riesgo la estabilidad del puente.

Atendiendo a estas condiciones, se planteó cómo rigidizar la roca sin afectar a su entorno. Debía ser algo que pudiera realizarse desde el nivel del túnel y que no penetrara demasiado en la capa de suelo/grava. Tras varias discusiones, la mejor propuesta ha sido congelar el agua presente en la roca y en el suelo alrededor del túnel, dando la estabilidad suficiente para ejecutar el revestimiento.



Figura 8. Sección de roca congelada. Imagen: Region Stockholm.

Para realizar el proceso de congelación se ha ejecutado una cámara de inyección desde la que se aplica el sistema. La temperatura bajo cero se mantiene durante toda la voladura de la roca congelada.

Desde un punto de vista estructural, el siguiente reto es disponer el hormigón sobre esa capa helada sin que afecte a sus propiedades. Para ello, se ha diseñado e incorporado a la capa más superficial de la roca un sistema de calentamiento que asegura que en todo el perímetro se mantiene al menos a $+5^{\circ}\text{C}$ sin comprometer la estabilidad del suelo congelado.

La acción accidental de una explosión también se considera en el diseño de los túneles y las estaciones. En los casos en los que la cubierta de roca es superior a 5 m, la roca puede soportar esa carga. Sin embargo, cuando es menor, como en este caso, es el revestimiento estructural el que debe dimensionarse para la

presión de la explosión. Para ello, se aplica una presión equivalente de 5 MPa sobre la corona del túnel. La simulación del análisis por elementos finitos muestra que la sección resulta dañada en 50 mm en su cara exterior y 150 mm en la cara interior. Por lo tanto, la sección restante debe resistir las cargas permanentes tras esa explosión.



Figura 9. Revestimiento en Mårtensdal.

De esta manera, se asume un espesor efectivo de 500 mm para toda la zona de la corona, siendo el espesor total del revestimiento de 700 mm. Asimismo, se ha dotado a la sección de una tercera capa de refuerzo para asegurar la capacidad de la sección después de las pérdidas señaladas.

3.3 Pasos inferiores y falsos túneles

En varias localizaciones de los túneles se producen cruces de los túneles de vía sobre otros empleados para acceso a las obras o bien para su mantenimiento. En estos cruces se diseñan marcos de hormigón sometidos a las acciones habituales del tráfico ferroviario.

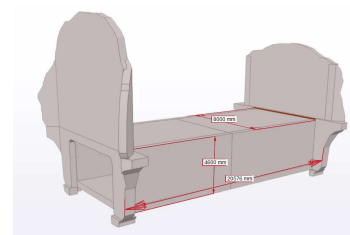


Figura 10. Modelo BIM de paso inferior.

Por último, ya en la zona más al sur, la línea de metro sale a superficie en Sockenplan. Esta transición obliga al diseño de estructuras de varias tipologías: emboquilles de los túneles, un falso túnel de sección cajón con un área interior libre de 10x7.25 m y de 120 m de longitud, y un tramo de muros de contención con sección en U de 120 m de longitud.

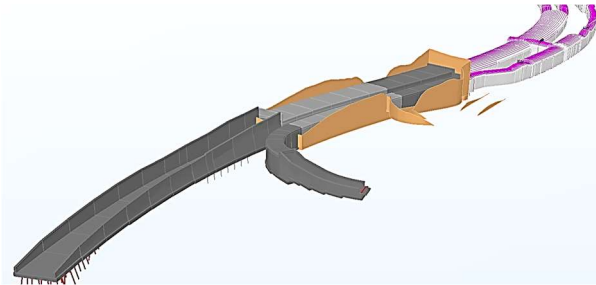


Figura 11. Modelo BIM de Sockenplan.

4. Obra civil en estaciones

El número total de estaciones diseñadas han sido siete. En el distrito de Södermalm, las de Sofia y Hammarby kanal. En el de Söderort, las de Gullmarsplan y Slakthusområdet, quedando en el de Nacka las de Sickla, Järla y Nacka. En las estaciones de Kungsträdgården y Sockenplan se ha realizado la adecuación de los túneles a las líneas ya existentes.

A continuación, se describen únicamente dos de ellas, Sofia y Gullmarsplan, por ser las más singulares y, por lo tanto, de más interés para este artículo.

4.1 Sofia

Esta estación presenta una serie de singularidades que la diferencia del resto de estaciones proyectadas. En primer lugar, destaca su único acceso: una torre de casi 100 m de profundidad construida en el interior de la roca y sin contacto con ella. Sólo existe una estación en Kiev, situada a 105 metros de profundidad, y posiblemente alguna en Corea del Norte, que se encuentran más profundas bajo la superficie.

La razón por la que la estación se encuentra a esa elevación se aprecia en la figura

12. Por un lado, para la continuación del metro desde Kungsträdgården, éste se sumerge bajo el agua del Saltsjön, y la máxima pendiente de la vía ya acota el nivel al que acercarse a la superficie. Por otro, la ubicación en la ciudad consolidada dificulta la ubicación de más de un acceso. Se han hecho estudios con varios accesos que se conectaban en un vestíbulo subterráneo, pero se desestimaron todos ellos tras pasar la consulta pública y acabó quedando la propuesta actual.

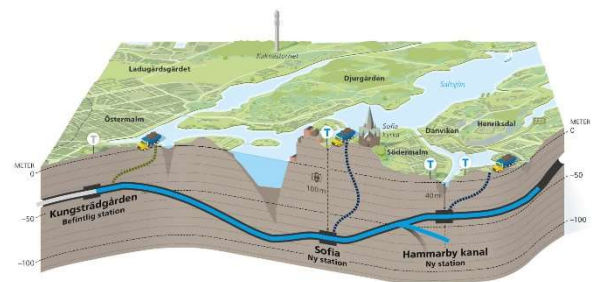


Figura 12. Perfil longitudinal del tramo de Södermalm. Imagen: Region Stockholm.

La torre tiene unas dimensiones de 20 por 20 metros en planta que dan cabida a ocho ascensores de gran capacidad y alta velocidad que funcionarán constantemente, así como escaleras de emergencia para una posible evacuación. Como se aprecia en la Figura 13, es un verdadero edificio de gran altura escondido en la roca.



Figura 13. Modelo BIM de Sofia.

Para la construcción del pozo se emplea primeramente un *raise boring* de 3.5 m de diámetro. A continuación, se realizan sucesivas voladuras desde la parte superior del pozo y por

el agujero se vierten los fragmentos de roca para recogerse desde el túnel del nivel inferior.

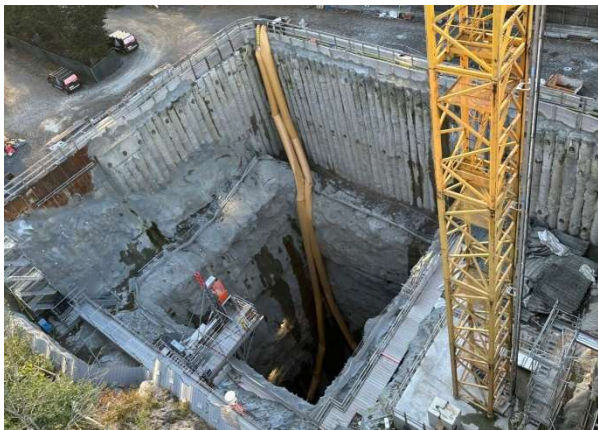


Figura 14. Ejecución de pozo de Sofia. Imagen: Region Stockholm.

La parte superior del pozo está situada en una zona de hasta 20 m de rellenos, y presenta una abertura de 35x45 metros en planta. Para la contención de las tierras se diseña una pantalla anclada de pilotes secantes empotrados en la roca, asegurando la estanqueidad y estabilidad del recinto.

La ejecución de la torre se plantea con un encofrado deslizante que da forma a los muros de 30 cm de espesor que la componen. Las plantas intermedias, dispuestas cada 5.5 m, se diseñan con estructura metálica y losas y escaleras prefabricadas a instalar una vez la torre esté completada.

El andén, al igual que en todas las estaciones de la ampliación, es central, posicionado entre ambas vías, con 145 metros de longitud y con una anchura singular de 15 m debido al acceso de los pasajeros por su parte central.



Figura 15. Andén de Sofia. Imagen: Region Stockholm.

4.2 Gullmarsplan

Gullmarsplan es un importante punto de conexión de autobuses y metro que conecta el centro de la ciudad y la parte sur de Estocolmo, con un tráfico diario de 84.000 personas.

La estación se sitúa a una profundidad de casi 70 metros por debajo del actual intercambiador de transportes. El acceso norte, en Mårtensdal, se materializa en los bajos de un edificio de nueva planta, mientras que el acceso sur comunica directamente el andén con la terminal de autobuses existente.

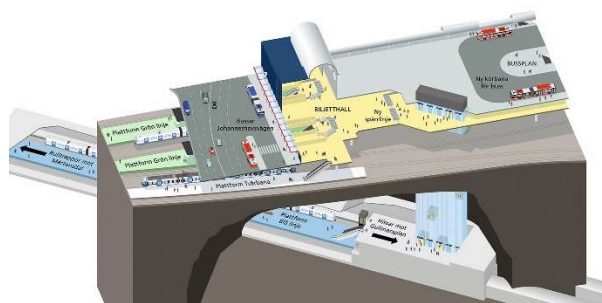


Figura 16. Ilustración de los distintos niveles de Gullmarsplan. Imagen: Region Stockholm.

Para realizar dicha conexión, se ha construido un pozo que alberga 4 ascensores de alta velocidad y facilita el tránsito de pasajeros en el intercambiador entre la nueva estación de la Línea Azul y las paradas de metro existentes de la Línea Verde, la Línea de Tranvía y la estación de autobuses.

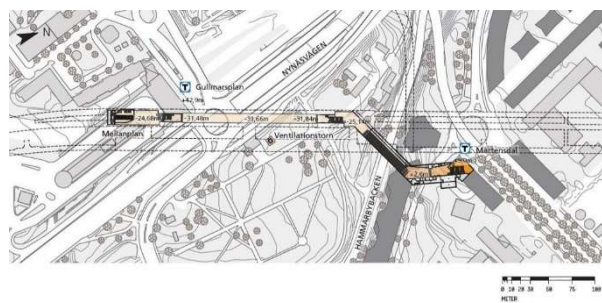


Figura 17. Planta y alzado de la estación. Imagen: TYPESA/Sweco.

El pozo tiene una sección trapezoidal de 200 m². La excavación se realiza combinando

primeramente un *raise boring*, finalizando el resto de la sección mediante *wire cutting*. La recogida de materiales se realiza desde los túneles inferiores.

Los diferentes niveles que conforman la torre se apoyan en ménsulas de hormigón ejecutadas en la roca. Una vez alcanzada la superficie, la torre cambia su tipología a una celosía metálica que salva los 21 m de luz entre ambos extremos del pozo en la roca.



Figura 18. Vista en planta de la excavación del pozo de Gullmarsplan. Imagen: Region Stockholm.

Para la instalación de esta estructura de 20 m de altura, se ha demolido y reforzado parte de los forjados existentes en el nivel actualmente empleado para la circulación y aparcamiento de los autobuses. La cimentación se resuelve mediante micropilotes inclinados, cuidadosamente estudiados para no afectar a los de las cimentaciones existentes.

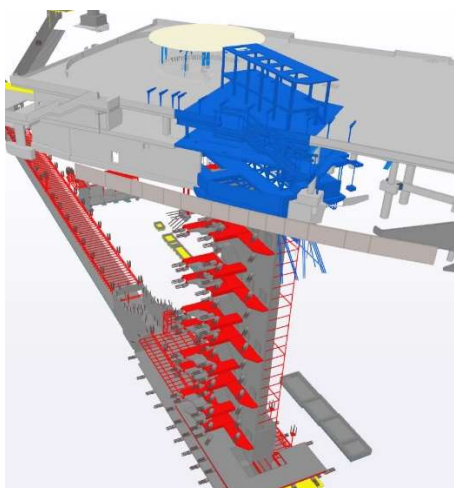


Figura 19. Modelo BIM de Gullmarsplan.

Asimismo, se han estudiado las cimentaciones de las estructuras existentes, las cuales quedan sin su recubrimiento de terreno

natural con las excavaciones. Por ello, han sido reforzadas con nuevos encepados de micropilotes que aseguran su comportamiento sin detener la actividad del intercambiador.



Figura 20. Hueco del pozo con el tráfico ferroviario. Imagen: Region Stockholm.

5. Estructuras de edificación

La naturaleza granítica del subsuelo, una gruesa capa de roca, la convierte en un factor espacial determinante en el diseño de las estaciones. La sección de bóveda única, con andén central y vías laterales, es la elegida en todas las nuevas estaciones del Línea Azul. Permite un trazado en planta limpio, y una relación con los accesos al vestíbulo y calle lineal y directa. El considerable ancho del andén, de 12,70 a los 15 metros dependiendo de la estación, junto con los 145 metros de longitud de todas ellas, contribuye a aumentar la sensación de espacio amplio, mejorando la proporción de las dimensiones de la estación.



Figura 21. Infografía de Sofia, zona de andén. Imagen: TYPsa/Sweco.

5.1 Arte y arquitectura

En 1957, la estación T-Centralen fue la primera en exhibir obras de arte, las cuales, a lo largo de los años, han experimentado cambios en su estilo debido a las condiciones arquitectónicas de las estaciones. En la actualidad, más del 90 % de las estaciones del metro de Estocolmo, incluso las descubiertas, exhiben el talento y la creatividad de los artistas locales, abarcando diversas expresiones artísticas como murales, esculturas, mosaicos y pinturas.

Dentro del alcance del proyecto de la Línea Azul se incluye el diseño arquitectónico y la integración artística en las nuevas estaciones y sus accesos.



Figura 22. Infografía de Gullmarsplan. Imagen: TYP SA/Sweco.

Los diseños incluyen estructuras ligeras de acero y hormigón, muros ligeros, fachadas de vidrio y soportes para los falsos techos. Además, la integración de los ascensores y escaleras mecánicas en las estaciones, y los soportes para los sistemas electromecánicos y los elementos artísticos.



Figura 23. Infografía de Nacka, zona de andenes. Imagen: TYP SA/Sweco.

5.2 Integración de accesos en edificios

Una de las cuestiones que más llama la atención en el Metro de Estocolmo es su relación con la calle. Como se mencionó anteriormente, las condiciones climáticas provocan una fuerte potenciación de la “vida interior”. Así, es frecuente encontrar los accesos a las estaciones en galerías comerciales o integradas en la planta baja de edificios.

Por ejemplo, la estación de Hammarby kanal está diseñada para que en andén se sitúe justo debajo del canal que le da el nombre, con una entrada al norte y otra al sur de éste. La estación adquiere un claro valor simbólico como vínculo físico entre una de las orillas del lago y el centro de la ciudad. Los accesos y la estación parecen tener más una condición de calle cubierta que de pasadizo, salvando un considerable desnivel en el ambiente acogedor de los vestíbulos y el andén.



Figura 24. Sección longitudinal de la estación. Imagen: Region Stockholm.

La entrada norte se sitúa en la planta baja un edificio residencial existente, en Katarina Bangata 80, de siete plantas de altura.



Figura 25. Acceso Norte de Hammarby. Imagen: TYP SA/Sweco.

Se ha realizado un estudio de viabilidad de la solución funcional, analizando la configuración estructural y de las cimentaciones del edificio para compatibilizar su uso actual con la geometría y usos requeridos. A partir de él, se han diseñado las operaciones necesarias para incluir el vestíbulo, escaleras mecánicas, zonas técnicas, etc.

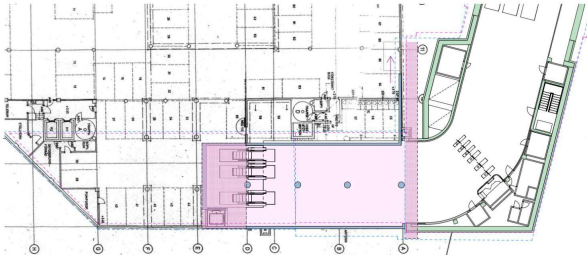


Figura 26. Acceso Norte de Hammarby.

El estudio concluye con el diseño del refuerzo de algunos de los pilares y vigas existentes, así como con la sustitución de elementos estructurales por nuevos sistemas de vigas y de cimentaciones.

5.3 Accesos en pabellones

La nueva estación de Slakthusområdet sustituirá a las estaciones de Globen y Enskedegården y cuenta con dos accesos. El acceso norte se encuentra en un edificio de oficinas a unos 200 metros de la actual estación de Globen. El acceso sur se ubica junto a un parque, y tiene dos entradas.



Figura 27. Acceso sur a Slakthusområdet. Imagen: TYP SA/Sweco.

En Hammarby kanal también se han diseñado estructuras singulares que sirven de entrada a la estación.



Figura 28. Acceso sur a Hammarby kanal. Imagen: TYP SA/Sweco.

6. Conclusiones

La ampliación del Metro de Estocolmo ha planteado importantes retos técnicos de muy variada índole, a los que hay que sumar también los culturales.

El empleo de metodología BIM como herramienta de coordinación multidisciplinar, así como la persecución de ambiciosos objetivos climáticos, garantizan una eficaz planificación de la producción y el desarrollo de diseños estructurales eficientes.

Referencias

- [1] Stockholm's new metro. Region Stockholm.
<https://nyatunnelbanan.se/stockholms-nya-tunnelbana/>