

Extensión Línea 2 del Metro:

Excavación que Trae su Técnica

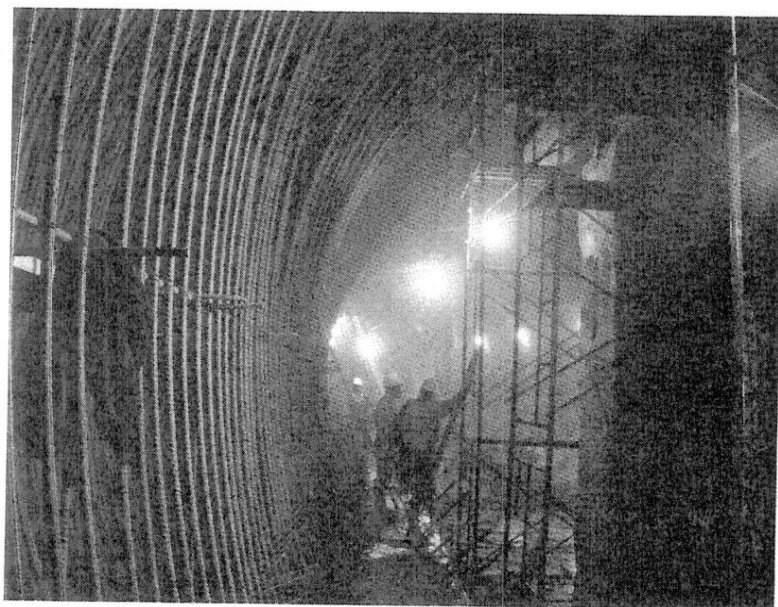
Alexandre Gomes
Jefe Supervisor de Obras
Martin Böfer
Jefe de Proyectos
Geoconsult ZT GMBH
Juan H. Cruz R.
Subgerente de Construcción Metro S.A

En la primera parte de este artículo, publicado en la revista anterior, se expusieron aspectos relevantes del diseño y construcción relacionados con el complejo sector de tuneado que ha sido desarrollado bajo el estribo del Puente Fray Andresito, ubicado sobre el río Mapocho frente a Av. Recoleta.

En esta segunda parte, los mismos autores discuten más detalladamente la metodología constructiva empleada y la ejecución de las obras de tuneado de este sector.

Generalidades

Así como fue relatado en la primera parte del presente artículo, el cruce del trazado de la Extensión Norte de la Línea 2 del Metro de Santiago con el río Mapocho, la Costanera Norte y el extremo norte del puente Fray Andresito, hicieron necesario el empleo de métodos constructivos que causarían un impacto mínimo sobre el entorno, incluyendo el diseño de medidas de socializado activas en la fundación del estribo del puente, y la implementa-



Armadura Túnel Principal

ción de un sistema de monitoreo de cargas y deformaciones muy sofisticado y preciso, específicamente desarrollado para este sector.

Considerando que el trazado en planta cruza diagonalmente la proyección de un extremo del estribo del puente, dejando parte de éste en voladizo, no fue posible utilizar un sistema de socializado tipo pórtico con pilas laterales que permitiera la excavación del túnel entremedio de ellas. Por lo tanto, fue materializado a través de seis pilas de hormigón colado in situ, que necesariamente quedaron emplazado dentro de la propia sección del túnel principal. De este modo, la excavación del túnel tuvo que sortear la situación, especialmente dificultosa, de cruzar por debajo de una estructura

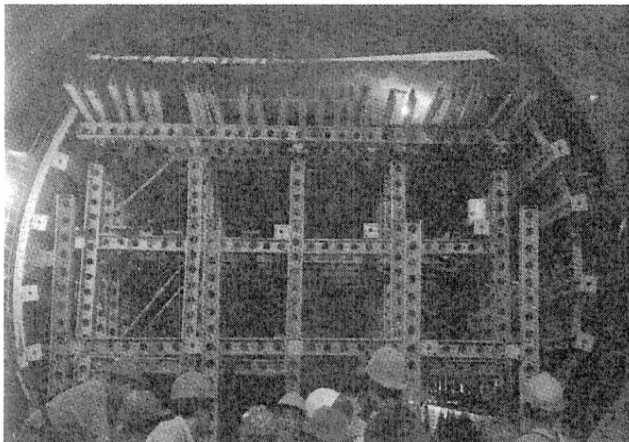
fuertemente cargada, haciéndolo al mismo tiempo, a través del uso de una metodología bastante compleja de excavación por entre las pilas que se interponían en el camino. En el artículo publicado en la edición anterior, se describió con detalle la metodología de socializado utilizada, la que se caracterizó por ejecutar cada una de las pilas en forma independiente y muy artesanal, tratando de reducir al mínimo posible la

relajación y deformación del suelo debajo de la fundación del estribo. Se destacó, en esa oportunidad, la estrategia que se empleó para evitar que se produjeran asentamientos del estribo, la que consistió en prevenir y compensar las deformaciones mediante gatas hidráulicas instaladas entre los dos cuerpos que conformaron las pilas. También se describió el sistema de monitoreo de cargas y deformaciones empleado, diseñado expresamente para esta obra, destacándose en particular su grado de sofisticación y automatismo. Este artículo enfoca básicamente la técnica de excavación empleada y de construcción del túnel, mediante el cual se logró lo que hoy día ya es realidad, es decir, tener la fundación del estribo del puente apoyada plenamente sobre el túnel de la Línea 2 del Metro.

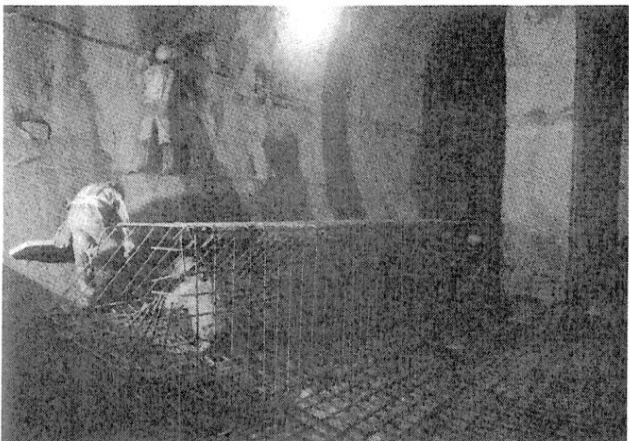
Para mayor información marque el 35 en su tarjeta

Obras de Túnelado

El túnel de línea bajo la fundación del estribo del puente Fray Andresito fue ejecutado según el método NATM (Nuevo Método Austriaco de construcción de Túneles), el que consiste en una excavación secuencial de sectores parciales de la sección transversal del túnel, seguida cíclicamente de la instalación inmediata de un revestimiento primario (de carácter temporal) de hormigón proyectado reforzado con mallas, marcos metálicos y barras de refuerzo, otorgando al terreno un confinamiento suficiente para que éste pueda participar activamente en la función portante.



Moldaje para Hormigonado del Túnel Principal



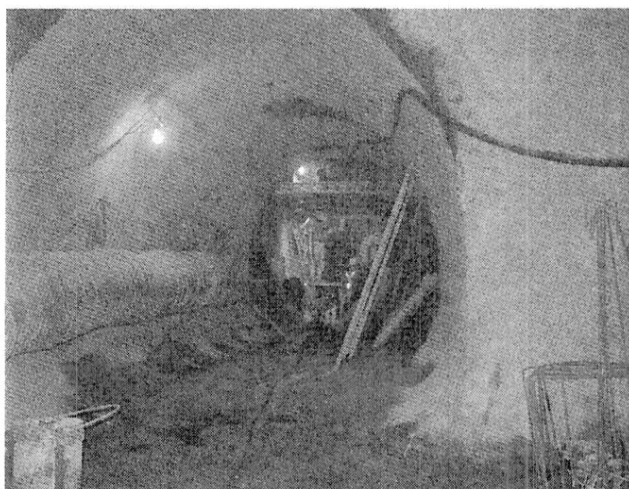
Instalación Contrabóveda de Hormigón Colado

Debido a las condiciones extremas de carga proveniente del estribo, y la proximidad del Río Mapocho, la estabilidad y resistencia estructural permanente le fue asignada por completo a un revestimiento secundario de hormigón armado moldeado en terreno, el que fue instalado en forma diferida en el interior del revestimiento primario de hormigón proyectado. Este anillo de hormigón que conforma el túnel principal, es capaz de soportar las elevadas cargas provenientes del estribo del puente mediante espesores mayores a 1 m en paredes laterales y de hasta 2 m en la clave.

A continuación, se relata en forma cronológica la secuencia de excavación y sostenimiento implementada hasta llegar a conformar el túnel definitivo.

Galerías de Socalzado

La primera actividad de excavación comprendió la construcción de pequeñas galerías de tamaño mínimo posible, las que fueron llamadas galerías de socalzado, en tanto que desde ellas se construyeron las pilas que cumplirían esta función. Estas galerías presentaron una forma ovoidal, cerrada anularmente, con un diámetro promedio aproximado de 3m. La excavación fue ejecutada con avances típicos de 1m, seguidos de la colocación inmediata del revestimiento de hormigón proyectado. Por su escaso tamaño, las actividades de obra se desarrollaron en gran medida en forma manual, asistidos por equipos como miniexcavadora y minicargadores adecuados al tamaño de lo que se hacía.

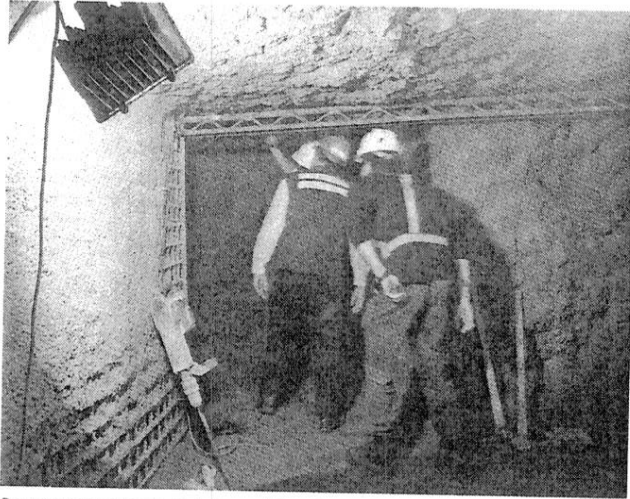


Galería de Socalzado

El primer tramo de galería permitió acceder a la zona bajo la proyección de la losa de fundación del estribo, y desde ese sector fueron ampliadas en dimensión a una sección de mayor altura, de modo de toparse con la parte inferior de la losa y convertirla en el propio techo de las galerías.

La primera galería de socalzado fue construida hasta casi el borde posterior del estribo, quedando cerrada en su extremo mediante un tímpano de hormigón proyectado reforzado. A modo de refuerzo y aumento de la seguridad, debido a la mayor altura, se decidió colocar puntales horizontales intermedios, de rigidización entre las paredes de la galería. Luego de construida la primera galería, fueron excavadas e instaladas las primeras cuatro pilas de socalzado, efectuándose la primera etapa de pre-hincado y transferencia de cargas de tres de ellas. Esta acción generó el primer apoyo activo del estribo, después del cual recién se inició la excavación de la segunda galería de socalzado -paralela a la primera- permitiendo así reducir los asentamientos causados al estribo a valores marginales.

La siguiente etapa de construcción comenzó con la demolición parcial y diferida de un sector de la pared lateral de la primera galería, a fin de ejecutar la excavación de la segunda galería de socalzado. Una vez finalizada la construcción de la segunda galería, se construyeron las dos pilas de socalzado restantes, seguido de las etapas de



Sector Inicial y Fondo de la Losa del estribo

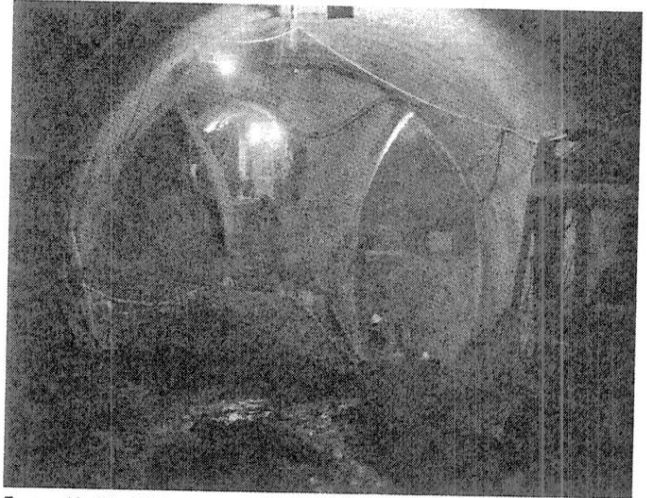
prehincado, transferencia de cargas y consolidación del terreno. Durante esta etapa las cargas de las gatas hidráulicas de las 6 pilas fueron aumentadas lentamente y en etapas parciales a un valor de hasta aproximadamente 500 ton por pila. Antes del inicio de la excavación del túnel principal, el sistema de gateo fue estabilizado con una carga total de casi 1500 ton, correspondiente aproximadamente al 60% de la carga vertical máxima del sector de estribo descalzado. De esta forma se logró compensar anticipadamente un descenso de las pilas, el que de otra forma se hubiera traducido en forma directa en un asentamiento del estribo a lo largo de la construcción del túnel.

Hasta el momento del inicio de la excavación del túnel principal, el descenso del estribo había llegado a ser de 3.5 mm, siendo el límite preestablecido en el diseño de 5 mm. Según estimaciones efectuadas por el Proyectista, las deformaciones siguientes no debían superar 1.5 mm, siendo por lo tanto aceptables los asentamientos medidos hasta ese entonces.

Luego de materializado el socialzado del puente se inició la construcción del túnel principal, tratándose de un tramo de longitud promedio de aproximadamente 20 m, medido entre el sector anterior del estribo y la pared Norte del túnel de la "Costanera Norte", al que el trazado del Metro cruza diagonalmente, por debajo, en dirección a la estación Cal y Canto.

En vistas a la gran dimensión del túnel del Metro (aproximadamente 100 m²), las severas condiciones de carga y la necesidad de limitación de deformaciones inherentes a la excavación, ésta se llevó a cabo a través de la subdivisión de la sección transversal en 3 sectores parciales, siendo éstos, dos galerías laterales independientes y una zona central (ensanche).

La subdivisión en 3 frentes paralelos independientes fue posible y necesario porque el ancho del túnel en este tramo es significativamente superior al típico, lo que por un lado se debe al gran espesor de la cáscara del revestimiento secundario y por el otro a que el túnel se desarrolla a lo largo de una curva bastante cerrada, requiriendo así un sobre-ancho por razones de gálibo de trenes. Las galerías laterales quedaron materializadas a través de paredes



Excavación Túnel Principal

laterales interiores de función temporal, las que posteriormente fueron demolidas.

El diseño se ajustó a las pilas de socialzado, de modo que éstas quedaron situadas en el ensanche central, teniendo un acceso independiente al sector de socialzado durante toda la construcción. La construcción se inició con la galería de mayor longitud (lateral derecha) la que fue seguida en forma diferida por la excavación de la galería lateral izquierda. Ambas galerías se completaron en todo su largo, instalándose un tímpano de hormigón proyectado en su encuentro con la pared norte del túnel Costanera.

La excavación de la zona de ensanche central del túnel se inició diferida a la excavación de las galerías laterales, manteniéndose un desfase mínimo de 4 m con el frente más adelantado. Dado que la excavación del sector de bóveda de la zona central coincidía en parte con las galerías de socialzado, a medida que dicha excavación avanzaba, las cáscaras de refuerzo de éstas se fueron demoliendo. Posteriormente, los sectores de banco y solera o contrabóveda fueron excavados desde dos zonas: uno por el frente y otro desde el costado, para el cual se ingresó por el extremo posterior de la galería lateral derecha a través de la demolición parcial de la pared interna. De este modo durante todo el plazo de excavación pudo tenerse acceso operacional al sector de las pilas y al sistema de gateo y monitoreo. Las paredes temporales de las galerías laterales fueron demolidas simultáneamente con la construcción, manteniéndose una longitud mínima de 6 m entre el sector a demoler y el último sector de contrabóveda instalado.

Luego de demolidas las paredes temporales y estabilizadas las deformaciones de la cáscara primaria del túnel principal, indicando que se había alcanzado un estado de redistribución de cargas estable, se decidió efectuar la remoción de las gatas hidráulicas. Esta decisión se debió a que las gatas ya no podrían ser efectivamente operadas y corrían el riesgo de ser dañadas durante el hormigonado del revestimiento definitivo del túnel. Llegado este grado de avance de la obra, las deformaciones máximas registradas en el estribo fueron del orden de 3.5 a 4 mm, por lo que se consideró aceptar el posible incremento de deformaciones asociado a este

procedimiento. La remoción se hizo según un meticuloso procedimiento previamente establecido, a través del cual se controló el comportamiento y las deformaciones de todas las estructuras involucradas. Habiéndose retirado las gatas, las cargas verticales del estribo se entregaron a unas columnas telescópicas de acero instaladas paralelamente a las gatas, insertas entre los dos cuerpos de las pilas, perdiéndose desde ese momento cualquier posibilidad de acción para el control de deformaciones o de cargas. Los asentamientos adicionales que se registraron durante este proceso fueron de un orden inferior a 1 mm.

Túnel Principal - Revestimiento Definitivo

Una vez completada la excavación del suelo y terminado el revestimiento primario de hormigón proyectado, correspondía instalar el revestimiento interior de hormigón moldeado, que sería el encargado de resistir las cargas permanentes provenientes del puente y garantizar las condiciones requeridas de estanqueidad y durabilidad de la estructura.

Debido a la alta cuantía de armadura prevista y los importantes volúmenes de hormigón involucrados (aproximadamente 950 m³), su materialización constituyó un gran desafío técnico. Una asesoría especializada en tecnología de hormigones, permitió concebir una dosificación adecuada, que no generaría fisuras por efectos térmicos o retracción de fragüe, cumpliendo con la resistencia H30 requerida por el proyecto. Adicionalmente se desarrolló un moldaje especialmente diseñado para el túnel y de técnicas específicas de colado, las que incluyeron ventanas y tubos de vaciado, como también tubos superiores para inyecciones de contacto entre ambos revestimientos: el hormigón proyectado del revestimiento primario (temporal) y la losa superior del túnel principal de función permanente.

El primer sector a ser hormigonado fue la contrabóveda del túnel, colado en un único paño. A esta operación le siguió el hormigonado de las paredes - en dos paños en sentido longitudinal - y finalmente la instalación de la losa superior del túnel en una única etapa.

Cabe destacar que el revestimiento definitivo del túnel tuvo que envolver las partes superior e inferior de las pilas de socialzado. Estas pilas fueron diseñadas de tal forma de disponer de un

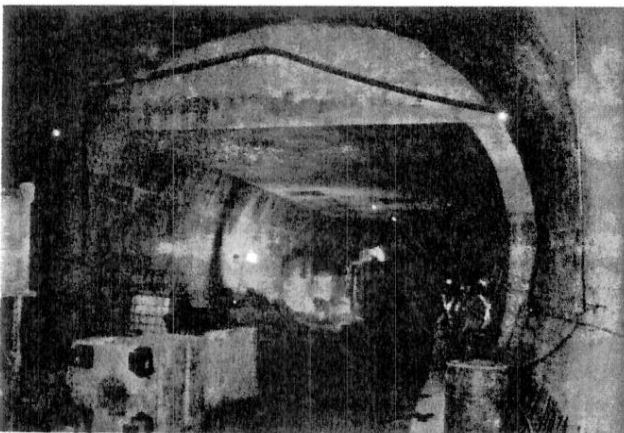
estrangulamiento en su cabezal o cuerpo superior, a través del cual se logró un encastre dentro de la losa de techo del túnel. Además, contaban con barras de refuerzo pasadas, instaladas junto con la ejecución de la pila, las que fueron unidas con la armadura del revestimiento definitivo a través de manguitos de conexión. Una vez que el revestimiento interior del túnel alcanzó su resistencia de diseño, los sectores inferiores de las pilas situadas dentro del túnel fueron demolidos, transfiriéndose así toda la carga del estribo directamente al revestimiento.

La demolición de las pilas fue ejecutada mediante una sierra de corte con cables de acero abrasivos del tipo hightek, evitándose perturbaciones sobre la cáscara del túnel de corta edad. Las partes protuberantes de la estructura de acero fueron cortadas y aplanadas con la ayuda de equipos de oxi-corte. Tal como fue previsto, las deformaciones generadas durante la etapa de transferencia de cargas del socialzado al túnel fueron marginales, manteniéndose por debajo de los 0.5 mm.

Conclusión

Después de concluida la totalidad de las obras de tuneleado del sector bajo el Puente Fray Andresito y estabilizadas las deformaciones, los asentamientos máximos registrados en la losa del estribo fueron del orden de 4.5 a 5 mm. Estos valores se inscriben justamente dentro del rango esperado del proyecto, garantizándose la limitación de impacto sobre el puente acordada con el departamento de Puentes del Ministerio de Obras Públicas. La evaluación de los resultados obtenidos durante la construcción respalda la importancia y eficacia de las medidas constructivas especiales implementadas para el presente proyecto en el alcance de dichos objetivos.

De esta forma, tal como fuera anticipado en el artículo anterior, las etapas finales de la ejecución de las obras de tuneleado bajo el puente Fray Andresito han confirmado el cumplimiento cabal de los objetivos del proyecto, así como el éxito de esta novedosa solución elegida por METRO S.A., el que ha logrado construir su línea por un sector de alta complejidad al mismo tiempo que ha mantenido un alto grado de atención y meticulosidad con relación a la limitación de los impactos de obra sobre el medio urbano. **B**



Túnel Principal Concluido

Referencias Método NATM

- Golser J., Another view of the NATM, Tunnels & Tunnelling, October 1978.
- Golser J., Recent developments in the NATM, Reprinted from Water Power & Dam Construction, February 1980.
- Rabcewicz L.v. The New Austrian Tunnelling Method. Water Power, 1964, 453-7, 511-4, Jan. 1965, 19-24.
- Schubert, W., Grundlagen der New Austrian Tunnelling Method, TU Graz, L.V. 220.001, V 3.0, 1997.
- Telford T., Sprayed concrete linings (NATM) for tunnels in soft ground, ICE design and practice Guide, Institute of Civil Engineers, 1996.