

New Austrian Tunnelling Method (NATM)

# Las profundidades de la innovación

Por **Marcelo Casares**  
(texto Metro Línea 4) y  
**Héctor Salazar**,  
Ingeniero Civil (texto La Pólvara).

Mientras en la superficie la ciudad continúa con su ritmo habitual, en las profundidades avanza la construcción de túneles utilizando innovadoras metodologías como se observa en el proyecto Camino La Pólvara y en un tramo de la Línea 4 del Metro.



La innovación no siempre se observa a simple vista. En algunas ocasiones actúa a varios metros de profundidad, por ejemplo permitiendo la construcción de un túnel sin alterar el normal desarrollo de una ciudad. Esto ocurre en la aplicación en nuestro país del New Austrian Tunneling Method - Nuevo Método Austríaco de Túneles (NATM), un método de diseño y construcción surgido en Europa en la segunda mitad del siglo XX y que consiste en una excava-

## Tramos Tunnelado Línea 4

Tramos	Constructora
Vitacura - Tobalaba	C.I.L
Colón	Sigdo Koppers
Bilbao - Sánchez Fontecilla	CON PAX TECSA
Príncipe de Gales - Simón Bolívar	D.P.S.
Plaza Egaña - Francisco Villagra	O.H.L.
Los Orientales - Grecia	Ferrovial Agroman-Besalco

ción secuencial de segmentos parciales de la sección transversal de un túnel, seguida cíclicamente de la instalación inmediata de un revestimiento primario temporal que combina el uso de hormigón proyectado reforzado con mallas o fibras metálicas, pernos de anclaje, marcos metálicos y/o barras de refuerzo, otorgando al terreno un confinamiento suficiente para que éste pueda participar activamente en la función portante (\*). Desde sus inicios el NATM destacó por innovación y por permitir el desarrollo de nuevos proyectos que se caracterizan por su economía, flexibilidad y rapidez. En Chile la aplicación del NATM comenzó en los '90, y en la actualidad hay dos proyectos emblemáticos que utilizan este método: Metro Línea 4 (Santiago) y Camino La Pólvara (Valparaíso).

### Metro Línea 4

La relación entre Metro S.A. y el sistema NATM lleva sus años, ya en 1994 se aplicó por primera vez esta metodología para la construcción de un túnel bajo el Parque Bustamante. Aunque en aquella oportunidad se cumplieron las expectativas, en los posteriores proyectos la ejecución del NATM fue evolucionando. «Los diseños y procedimientos han tenido un acelerado avance, por ejemplo hoy se construyen en subterráneo no sólo las interestaciones sino también las propias estaciones, con secciones del orden de los 160 metros cuadrados», afirma Vicente Acuña, gerente de Proyectos de Metro. La estrategia que se ha seguido en la Línea 4 y en otros proyectos (Cumming, El Parrón y La Cisterna, y Patronato y Cerro Blanco\*) consiste en partir de un sitio expropiado previamente. A continuación se construye un pique lateral que más tarde servirá de acceso a la estación propiamente tal, pero que durante la faena es el punto de partida de una galería de acceso ortogonal al eje del trazado. Por el pique se extrae el material de la excavación tanto de la galería de acceso como del propio túnel estación.

(\*) Más información BIT 29, página 53.  
[www.revistabit.cl](http://www.revistabit.cl)



Ejecución de obras en los túneles del nuevo proyecto de la Línea 4 del Metro. Estaciones Tobalaba y Bilbao.

## HORMIGÓN PROYECTADO

En el proyecto Metro de la Línea 4 se utiliza hormigón proyectado (shotcrete) por vía húmeda, sistema que se define, como el procedimiento mediante el cual todos los componentes del hormigón, incluida el agua, son transportados mediante aire comprimido (flujo diluido) o bien mediante bombeo (flujo denso) hasta la boquilla de salida.

En este caso la razón agua cemento debe ser inferior a 0,5, situación que incide directamente en la resistencia final de la mezcla, así como en la efectividad del acelerante, dentro de los primeros minutos. El tamaño máximo del árido debe ser del orden de los 8 mm. Por las exigencias de resistencias mecánicas a corta edad, en las mezclas de shotcrete, normalmente se utilizan cementos de alta resistencia en dosis que sobrepasan los 380 kilos de cemento por metro cúbico. La trabajabilidad o fluidez de la mezcla para un sistema de proyección debe estar por sobre los 18 cm, medidos en el cono de Abhrams.

Más información:  
Productos Aliva, empresa perteneciente a Sika.  
[www.sika.cl](http://www.sika.cl)

En la actualidad el NATM se emplea en la nueva Línea 4 del Metro en la construcción subterránea de túneles y estaciones mediante la excavación previa de piques y galerías, en el tramo comprendido entre Tobalaba y Grecia, con ocho estaciones y una extensión cercana a los 8 kilómetros. La elección de este sistema se basa en las propiedades mecánicas del terreno de esta zona aptas para ese tipo de construcción. El suelo de Santiago en el área perteneciente a la cuenca del Mapocho está constituido por un horizonte superficial de terreno alterado de 1 a 3 metros, seguido de gravas arenosas correspondientes a la llamada segunda depositación del río Mapocho, de un espesor variable entre 5 y 7 metros y, bajo éste, una grava arenocilosa denominada primera depositación.

Al elegir la construcción de un túnel para un proyecto, resulta casi impensable aplicar otra metodología que no sea el NATM. «Antiguamente el metro se construía a tajo abierto, cerrando grandes avenidas y excavando con taludes, destruyendo totalmente las calles. Hoy la comunidad no habría aceptado el desarrollo de un proyecto bajo esas condiciones. Otra alternativa serían los sistemas basados en máquinas tuneleras, que son eficientes en ciudades europeas que presentan características de suelos que permiten alcanzar altos niveles de eficiencia. Por ejemplo, el suelo de Madrid no tiene una sola piedra, en donde se obtienen velocidades extraordinarias en el avance del túnel. Pero para las condiciones de nuestro suelo, muy cohesionado, la mejor solución es el NATM», explica Acuña.



Vicente Acuña,  
gerente de Proyectos de  
Metro.



Alejandro Albertz,  
ingeniero administrador  
de obra de Tecsa.

### Hormigón y monitoreo

En el sistema NATM aplicado en la Línea 4 destaca el aprovechamiento de las características del hormigón proyectado para el sostenimiento primario y también de terminación (secundario) en los túneles de estación, que pueden llegar a un ancho de 17 metros y una altura de 12 a 13 metros. Esto requiere de un diseño de ingeniería de alto nivel, incluyendo especificaciones técnicas particulares y métodos constructivos especiales, más un riguroso control de calidad y el seguimiento permanente de la obra.

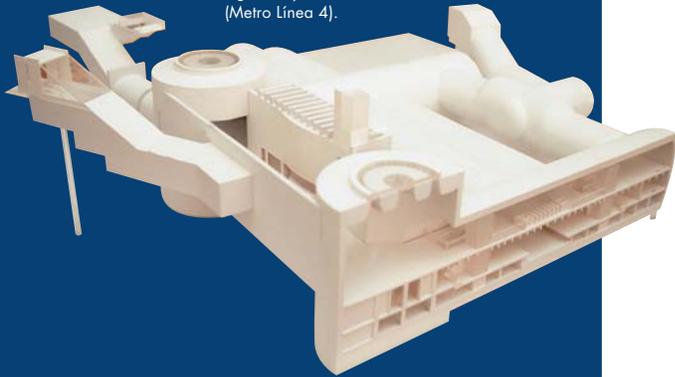
Dado que el hormigón proyectado es el material básico para esta aplicación se optimizaron sus características más relevantes, tales como resistencia a edad temprana, permeabilidad y aditivos plastificantes y acelerantes entre los que destaca el uso de fibra en la dosificación. Asimismo, los aspectos de técnicas de aplicación han debido ser mejorados incorporando equipos adecuados altamente automatizados, porcentaje de pérdida por rebote, capacitación al personal y avanzadas técnicas de control de calidad.

Otro de los aspectos centrales de la obra es el monitoreo de deformaciones tanto de las secciones de túnel en su interior, como también en la superficie y edificios cercanos, que se realiza con instrumental topográfico y de medición de tensiones en los revestimientos de túneles terminados, lo que también resulta esencial para aprovechar adecuadamente las características del suelo. Para conseguir esto, los modelos predictivos para la interacción entre el suelo y la estructura están basados en elementos finitos, que consideran los parámetros de mecánica de suelos y las etapas de construcción del túnel, entregando estimaciones de los esfuerzos generados en la estructura misma y de la deformación interior y en superficie.

También sobresale en este sistema el diseño de las estaciones subterráneas de paso, en el cual se ha logrado una completa integración entre los procedimientos constructivos y la funcionalidad de la estación. Así se tiene que el pique

continúa en página 26

Maqueta del Pique Tobalaba que incluye galería y túnel (Metro Línea 4).



necesario para la aplicación del método NATM constituye posteriormente el núcleo de locales técnicos y de operación de la estación, y la galería se transforma en el puente mesanina.

La economía es otra de las variables fundamentales de esta metodología. La ejecución de túneles se efectuó excavando con maquinaria común (retroexcavadoras), y la fortificación inmediata con hormigón proyectado (shotcrete) y armadura convencional (malla y barras comunes). Dada la calidad del suelo, de grava fluvial muy cohesionada que permite buenos rendimientos en excavaciones, ha resultado innecesaria la utilización de onerosos y sofisticados equipos de amplio uso en otros países, como los TBM o «topos», realizando estos trabajos a costos muy razonables.

## Desafíos bajo tierra

Un dato interesante del proyecto fue que Metro decidió distribuir en seis contratos la construcción de los 8 kilómetros de túnel. «Se dividió el trazado en seis tramos equivalentes, cada uno corresponde a una licitación independiente, y tenemos de 10 a 12 empresas participando del tunelado. Optamos por esta fórmula porque nos permite una construcción más rápida y un mejor control del avance de cada tramo», señala Acuña.

El contrato correspondiente al tramo Bilbao - Sánchez Fontecilla fue adjudicado a la constructora Tecsa, se trata de la ejecución de un túnel de 1.600 metros. La obra gruesa se concluyó recientemente y actualmente se están haciendo las terminaciones con plazo de entrega final fijado para septiembre del 2005.

La aplicación del NATM en este tramo cumplió con las expectativas del proyecto original, en cuanto a beneficios en ejecución y en costos reducidos. Además, se lograron ritmos de avances sumamente eficientes: entre dos y tres metros cada 24 horas.

Como todo sistema constructivo, el NATM también de-

bió enfrentar algunos desafíos en las profundidades, como señala Alejandro Albertz, ingeniero administrador de obra de Tecsa: «El terreno no es uniforme en todo el trayecto del túnel, por ejemplo nos encontramos con napas, en especial, porque estamos al lado del canal San Carlos, un acueducto de mampostería muy antiguo y que obviamente tiene filtraciones. Además, enfrentamos fugas de alcantarillados y de matrices de agua potable». El profesional plantea que cuando ocurren goteos no se originan mayores inconvenientes, pero sí cuando se incrementa el caudal de la filtración y hay escurrimientos de barro. En este último caso se generan atrasos en la obra (que pueden superar el mes), pues para extraer el agua y el lodo se requieren maquinarias y sistemas de bombes que causan serios inconvenientes al interior del túnel.

Otro de los desafíos que podría enfrentar el NATM, pero que no se dio en este tramo, es que en la clave, la parte superior, haya sólo piedras y un bajo contenido de arcilla y tierra. En ese caso se produce un desprendimiento de terreno de consecuencias insospechadas. «En nuestra obra es muy difícil que ocurra una situación así, ya que se aplica rápidamente el hormigón proyectado y el grado de avance (2 metros) no ocasiona grandes traumas. Además, se hace un permanente monitoreo de deformaciones al interior túnel y en la superficie», agrega Albertz.

Las cualidades del sistema NATM están a la vista, ya que hace posible el desarrollo de las obras casi sin perturbar las actividades normales de la ciudad. Entonces, se puede vislumbrar una larga vida de esta metodología en el país. «El NATM aporta un alto grado de innovación a la construcción de túneles en Chile. Es una tecnología que se puede aplicar en obras de colectores de aguas lluvias y túneles viales, entre otros. En los próximos proyectos del Metro se analizará la naturaleza del terreno, de los trazados y se escogerá el mejor método constructivo. Pero en caso de optar por túneles, sabemos que con el NATM podemos atravesar la ciudad casi sin causar inconvenientes en la comunidad», concluye Vicente Acuña.

## Camino La Pólvara

En el nuevo Camino La Pólvara (Figura 1), que forma parte de una solución vial al acceso sur al puerto de Valparaíso, se unen condiciones especiales pues se encuentran barreras naturales como los cerros de la ciudad y las características particulares de construcción urbana, con sus implicaciones técnicas, ambientales y sociales. Este proyecto incluye la construcción de tres túneles por el sistema NATM, cuyas longitudes alcanzan los 310, 440 y 2.200 metros respectivamente. Los dos primeros se encuentran terminados en el proceso de excavación y soporte, y el más extenso presenta un grado de avance del 70%, siendo mayo

del 2006 el plazo de entrega para la obra completa.

La decisión de emplear este método de tunelado se basa en los beneficios de su uso en condiciones de geología compleja, en cercanía de zonas urbanas, con túneles de geometría y longitudes variables. Además, considerando algunos rasgos de la obra como profundidades del orden de los 90 metros y la necesidad de pasar por debajo de una ciudad pintoresca como Valparaíso, declarada Patrimonio de la Humanidad, era imposible emplear otros métodos de tunelado como el «tajo abierto», y opciones como las máquinas tuneladoras no resultaban rentables para las longitudes de los túneles de este proyecto.

Ante este escenario, el NATM constituye un sistema que reporta beneficios en costos y plazos de construcción. La aplicación del NATM en el Camino La Pólvora se desarrolló en cuatro fases: Diseño conceptual, Anteproyecto, Proyecto de ingeniería e Ingeniería de detalle.

### **Diseño conceptual**

En esta etapa se seleccionó y confirmó el trazado de la vía y los túneles, con el respaldo de abundante información para confeccionar un presupuesto preliminar. Entonces se procedió a trazar el objetivo y la verificación del diseño conceptual. Luego se definió el espectro de trazados alternativos y selección del trazado preferido, la caracterización geotécnica basada en información geológica e hidrogeológica y la validación del proyecto con relación a aspectos de impacto ambiental, considerando la influencia en el régimen de agua subterránea, asentamientos urbanos, ruidos, vibraciones, contaminación con polvo, entre otros. Finalmente, se realizó la estimación preliminar de costos y el programa previo de construcción.

### **Anteproyecto**

Se desarrolló para la obtención de la aprobación por parte de las autoridades con relación a aspectos legales. A esto siguió la ejecución de ensayos de laboratorio sobre muestras de roca y suelo para efectuar un pronóstico geotécnico e identificar las características típicas del subsuelo, incluyendo la definición de parámetros geotécnicos para cálculos. Otros aspectos relevantes de esta fase fueron la identificación del emplazamiento de portales, posibles accesos intermedios y piques de ventilación; diseño preliminar de estructuras exteriores y sostenimiento de taludes; desarrollo de secciones típicas de cavidades subterráneas; selección de métodos de excavación; y definición y distribución de tipos de soporte del macizo.

A continuación se analizaron las medidas de impermeabilización; los requerimientos de operación y seguridad (ventilación, combate de incendios, iluminación, comunicaciones y controles, entre otros); y definición de aspectos logísticos de la obra.

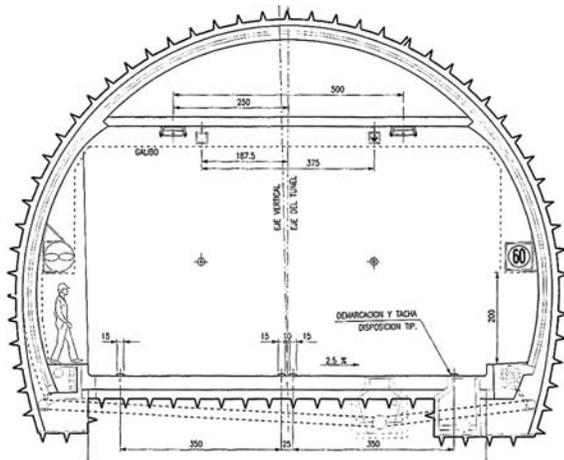
**Figura 1**

**Ubicación del Proyecto Camino La Pólvara**



**Figura 2**

**Sección Tansversal del Túnel Principal**



**Figura 3**

**Túnel con iluminación, ventilación y sistemas de seguridad**



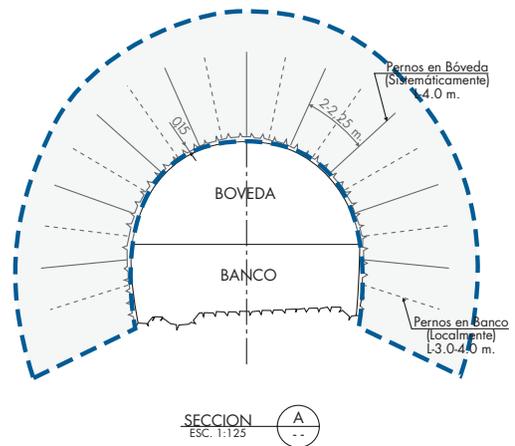
**Proyecto de ingeniería**

Se detallaron los trabajos para contar con un cálculo minucioso de costos de construcción y elaboración de documentos contractuales. Además, se diseñaron las estructuras y se revisaron el pronóstico geotécnico, el diseño de medidas de sostenimiento, la distribución de clases de sostenimiento y las medidas auxiliares de construcción. En el diseño de detalle se incluyó una descripción de todas las obras del proyecto para lograr la elaboración de los túneles en forma económica y estructuralmente seguros.

**Figura 4**

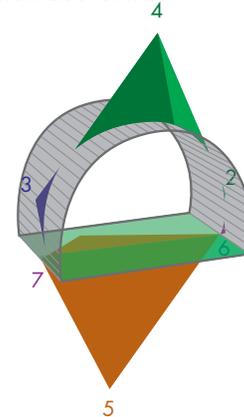
**Ajuste y Optimización del sostenimiento**

Ajuste de la separación entre pernos, la longitud de éstos y su orientación



**Figura 5**

**Análisis estructural Túneles La Pólvara**



**Ingeniería de detalle**

En esta etapa destaca el ajuste y optimización permanente del diseño a los requerimientos particulares de excavación y sostenimiento seleccionados para la construcción, y a las condiciones geológico / geotécnicas encontradas a diario en cada avance de excavación (Figura 2).

Aquí cobran gran relevancia los planos de diseño para construcción que contemplan replanteo, armadura, listado de barras y planos de fabricación. En general, para túneles en roca los métodos de diseño estructural y de estabilidad geotécnica son analíticos y numéricos, confirmándose la estabilidad del túnel en el frente e instalándose detrás del revestimiento primario uno secundario de hormigón moldeado con espesor uniforme, que garantiza la estabilidad a largo plazo.

En túneles de poca tapada como en el caso de los de La Pólvara, el diseño estructural se basa en cálculos computacionales (Figura 3) y análisis del monitoreo (Figura 4), para economizar el diseño (Figura 5).

Una de las premisas del NATM en la construcción de los túneles del proyecto La Pólvara es que durante la obra se actualiza constantemente el modelo geológico/geotécnico propuesto en el diseño. Para esto se siguen cuatro pasos en forma sistemática con el fin de lograr una construcción segura, rápida y económica:

**Paso 1:** Determinación del «Tipo de macizo», sobre la base del chequeo de parámetros geotécnicos en el frente mediante la clasificación geotécnica de Bieniawsky.

**Paso 2:** Determinación del «Tipo de comportamiento geomecánico del macizo», sobre la base de observaciones en obra y del monitoreo (tensiones, modo de deformación de la cavidad, mecanismos de falla, resultados de sondajes de exploración en el frente). Se efectúa la determinación del tipo de comportamiento geomecánico del macizo para el siguiente módulo de avance de excavación.

**Paso 3:** Determinación de la Excavación y la Fortificación, sobre la base de las indicaciones del Programa Básico de Construcción. Las condiciones del macizo deben ser chequeadas permanentemente con el pronóstico; se debe revisar permanentemente el modelo geológico/geotécnico. Los datos adicionales obtenidos en obra son la base para la determinación de las medidas de excavación y fortificación a ser adoptadas.

**Paso 4:** Verificación del comportamiento del sistema con los requerimientos previstos, sobre la base del monitoreo; siempre que existan diferencias entre el comportamiento pronosticado y el evidenciado en la realidad, deberán revisarse los parámetros y criterios mediante los que se ajusta el «tipo de macizo» y «tipo de comportamiento geomecánico del macizo». La optimización y ajuste se decide adicionando o disminuyendo elementos de sostenimiento y ampliando o reduciendo las longitudes de avance. 

## en síntesis

**La aplicación en nuestro país del Nuevo Método Austriaco de Túneles (NATM) permite la construcción de túneles de manera más económica, flexible y rápida. El NATM, que consiste en una excavación seguida de la inmediata instalación de un revestimiento primario temporal, actualmente se está aplicando con éxito en un trayecto de la nueva Línea 4 del Metro y en el Camino La Pólvara en Valparaíso.**

[www.metrosantiago.cl](http://www.metrosantiago.cl)

[www.vialidad.cl](http://www.vialidad.cl)