








METRO
DE SANTIAGO®

EMPRESA DE TRANSPORTE DE PASAJEROS
METRO S.A.
DIVISIÓN PROYECTOS DE EXPANSIÓN

ANEXO IV
Memoria Explicativa de los Métodos Constructivos
de los Túneles del Metro de Santiago

0	21/08/17	Uso	J. Herrera	E. González	H. González
REV N°	FECHA	EMITIDO PARA	ELABORADO POR	REVISADO POR	APROBADO POR
 METRO DE SANTIAGO		PL3-00-7400-INF-000-TU-00104			Página 1 de 29
					Revisión 0

APROBACIONES

DIVISIÓN PROYECTOS DE EXPANSIÓN		FIRMAS	FECHA
PREPARADO POR	 José Herrera	 Juan Carlos Perdomo	14-08-2017
REVISADO POR	Edgardo González		17-08-2017
APROBADO POR	Héctor González		21-08-2017

CONTENIDO

CONTENIDO.....	3
1. INTRODUCCION	4
2. MÉTODO NATM	4
2.1. Principios del NATM	5
3. SECUENCIA DE EJECUCIÓN - MÉTODO NATM	6
3.1. Excavación – Longitud de Avance	6
3.2. Sello de la frente	7
3.3. Revestimiento Primario	7
3.4. Monitoreo de Deformaciones.....	8
3.5. Revestimiento Secundario	10
4. DEFORMACIONES Y CONTROL DE ÉSTAS EN EL MÉTODO NATM.....	11
4.1. Marco Teórico-Empírico.....	11
4.2. Control de las Deformaciones.....	13
5. CLASIFICACIÓN DE TÚNELES Y SUBDIVISIONES TÍPICAS DE SUS SECCIONES	15
5.1. Túneles pequeños	15
5.2. Túneles medianos	16
5.3. Túneles grandes	18
6. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES EN ENTORNOS URBANOS	20
6.1. Etapa de Diseño	20
6.2. Etapa de Construcción	22
6.3. Plan de Acción ante Deformaciones	26
6.4. Verificación de Afectación de las Deformaciones a Edificios Vecinos	27

1. INTRODUCCION

Los túneles del Metro de Santiago se diseñan y construyen siguiendo los principios del Nuevo Método Austríaco de Construcción de Túneles, abreviado como NATM por sus siglas en inglés (New Austrian Tunnelling Method). La utilización de este método para la ejecución de los túneles de Metro viene desde el año 1994 en adelante, con motivo de la extensión de la Línea 5 desde la estación Baquedano hasta la estación Santa Ana, en donde el trazado pasó de forma subterránea bajo las calles Catedral y Monjitas, en el entorno de las cuales existen importantes edificios patrimoniales (Ilustre Municipalidad de Santiago, Correos de Chile, Museo de Santiago, Catedral de Santiago, Iglesia Santa Ana, etc.) y altos edificios habitacionales y comerciales. Si bien en sus inicios se ejecutaron de esta forma sólo los túneles Interestación (túnel vía entre estaciones), a partir del año 2000 se comenzó a utilizar este método también para los grandes túneles que albergan las estaciones, con exitosos resultados hasta la fecha.

2. MÉTODO NATM

El método NATM es el método de diseño y ejecución de túneles en suelo y rocas más extendido y de mayor éxito en todo el mundo dentro del ámbito de la ingeniería civil. Surgido en Europa en la segunda mitad del siglo XX, corresponde a un método semi-empírico desarrollado originalmente para rocas a partir de los estudios del ingeniero austriaco Ladislaus von Rabcewicz y los conceptos de convergencia-confinamiento desarrollados por los también austriacos Fenner y Pacher, quienes lograron establecer un acuerdo entre los fenómenos observados y las leyes de la mecánica de rocas y suelos.

El desarrollo del método proviene de la amplia experiencia extraída de la ejecución de múltiples túneles realizados en los Alpes durante el siglo pasado. Si bien, esa experiencia fue adquirida por expertos de distintos países que comparten territorio con esa cadena montañosa, el método se hizo extensivo a suelos y fue patentada finalmente por Rabcewicz como tal el año 1964.

Los conceptos inherentes al método NATM son:

- ▶ El subsuelo puede/debe ser partícipe en la función portante de la cavidad
- ▶ La participación se logra permitiendo que el subsuelo se deforme, con ello se activa la resistencia al corte
- ▶ Para aumentar la función portante del suelo, debe proveerse a éste un confinamiento radial

Para conseguir lo anterior, el método consiste básicamente en realizar una excavación secuencial de la sección transversal de un túnel (o de segmentos parciales, según la dimensión de la cavidad), en longitudes de avance predeterminadas, seguida cíclicamente de la instalación inmediata de un sostenimiento temporal de la frente excavada, que le otorgue al terreno un confinamiento suficiente para que éste pueda participar activamente en la función portante.

La instalación de ese sostenimiento temporal en la frente recién excavada fue posible sólo gracias al desarrollo de la técnica denominada “hormigón proyectado” (o shotcrete), técnica creada y utilizada desde mediados del siglo pasado en Europa, y que consiste en la colocación del hormigón mediante la proyección a distancia de éste, utilizando para ello aire a presión. La mezcla de cemento y áridos que componen el hormigón, ya sea seca o húmeda, es transportada a la frente mediante una manguera, a la cual se le aplica aire a presión en su boquilla o pitón, para lanzar el hormigón con fuerza hacia el sitio en que se requiere colocar.

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. Ello, sobre todo considerando que para el caso de suelos blandos, como es el caso del suelo de Santiago, sólo se requiere el uso de maquinaria convencional, como lo son; retroexcavadoras, cargadores frontales, camiones para retirar el suelo excavado (marina) y equipos de bombeo a presión para el hormigón proyectado.

2.1. Principios del NATM

El NATM es un método que se basa principalmente en considerar la capacidad del suelo o roca de auto soportarse temporalmente. Toda roca y suelo, tiene, en mayor o menor grado, la habilidad inherente de permanecer libre de soporte por una cierta cantidad de tiempo; las rocas duras pueden permanecer libres de soporte por cientos de años, mientras que la capacidad de auto soporte de rocas y suelos de características más débiles o blandos es relativamente corta (minutos, horas, días o años).

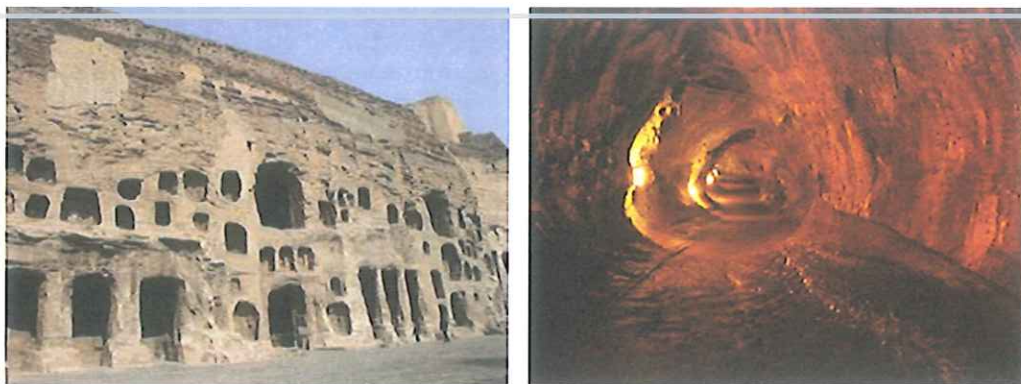


Figura 1. Excavaciones y cavidades en rocas

El NATM puede ser definido como un método de generación de cavidades subterráneas utilizando todos los medios disponibles para desarrollar la máxima capacidad de auto sostenimiento de la roca o suelo para proveer estabilidad a la cavidad. El principio central del NATM puede ser explicado como el concepto de transformar el terreno que rodea el perímetro del túnel, de una “carga actuante”, en un miembro del sistema que “soporta cargas”.

Para poder desarrollar esa capacidad auto portante del suelo que permita la ejecución de túneles según el método NATM, se debe seguir una estricta secuencia de actividades, que se detalla en el capítulo siguiente.

3. SECUENCIA DE EJECUCIÓN - MÉTODO NATM

3.1. Excavación – Longitud de Avance

El método se inicia con una excavación de la sección transversal del túnel a ejecutar (o de segmentos parciales de ésta, según la dimensión de la cavidad, tipo de suelo, profundidad, etc.) en una longitud de avance predeterminada. Es imprescindible controlar y respetar el avance de excavación, esto es, la longitud de avance sin soporte. Para ello, dicha longitud debe ser previamente definida en función del tipo de suelo, de las modelaciones numéricas que se realicen como parte del diseño del túnel y del conocimiento específico del comportamiento del tipo de suelo.

La excavación para el caso de túneles en suelo se realiza utilizando maquinaria convencional (retroexcavadora), luego de lo cual la marina es removida de la frente de trabajo mediante cargador frontal para ser finalmente retirada del túnel mediante el mismo cargador, camión u otra maquinaria de carguío.



Figura 2. Excavación de la frente y carguío

3.2. Sello de la frente

Para aprovechar al máximo la resistencia propia del terreno, se requiere conservar al máximo la integridad del terreno intervenido. Para ello, es imprescindible la aplicación inmediata de hormigón proyectado sobre el frente recién excavado, de manera de confinar el terreno, evitando su degradación, desecación y sobre-excavación. A esa primera capa de hormigón proyectado se le denomina “sello”.

Para la aplicación del sello se utiliza tanto la proyección manual, mediante un pitonero en la frente, así como la proyección mecanizada, con la utilización de máquinas robotizadas, controladas a distancia de la frente. Hoy en día, por razones de seguridad y rendimiento, ya es práctica habitual la utilización casi exclusiva de maquinaria robotizadas de proyección, o roboshots.



Figura 3. Sistemas de proyección del hormigón. Manual (izq.), Mecanizada (der.)

3.3. Revestimiento Primario

Dado que el avance del túnel produce descompresión por adelante del terreno, es recomendable colocar rápidamente un soporte primario. Este soporte primario lo denominamos “Revestimiento Primario”, o “Sostenimiento”, y consiste en aplicar a la cavidad recién excavada una cáscara semi-rígida, que sea capaz de adaptarse al contorno del terreno, logrando distribuir cargas, evitando concentrar tensiones y permitiendo refuerzos graduales a medida que sean necesarios. Esta capa actúa como una primera etapa de soporte, creando un nuevo estado de equilibrio. Este revestimiento inicial debe ser capaz de aceptar la deformación necesaria, pero previene los efectos del desarrollo de la carga del terreno. Para ello, el revestimiento primario se materializa mediante la aplicación de hormigón proyectado, el cual es reforzado con mallas y marcos de acero reticulados, y tiene la función no de tratar de soportar las presiones originadas por el terreno, sino que de estabilizar las deformaciones requeridas para movilizar la resistencia inherente del terreno.

El espesor del hormigón proyectado, la cuantía de acero de refuerzo, así como la cercanía de los marcos de acero, surgen del conocimiento del tipo de terreno y de las modelaciones numéricas que se realizan como parte del diseño de los túneles en pos de minimizar las deformaciones del terreno y situarlas en el rango definido de acuerdo al entorno y a las cargas actuantes en esta etapa.



Figura 4. Revestimiento Primario o Sostenimiento: Múltiples avance con hormigón proyectado + mallas + marcos reticulados de acero

El efecto de esta primera cáscara sobre las deformaciones del terreno se hace más efectivo si además se cierra completamente formando un anillo (caso de túnel de sección circular, semi circular u ovoidal). En cualquier caso, para reducir aún más las deformaciones del terreno, se debe reducir al máximo la distancia entre la frente y el cierre del anillo de refuerzo.

3.4. Monitoreo de Deformaciones

Para que el método funcione correctamente, se debe realizar un seguimiento de control para verificar la estabilización del sistema. Para ello se debe contar con un estricto programa de “monitoreo de deformaciones” del entorno que permita confirmar el equilibrio del sistema dentro de los rangos de tensiones y deformaciones esperados durante la fase de excavación y colocación del revestimiento primario. Este control es necesario debido a la heterogeneidad del terreno y a la dificultad de predecir el comportamiento del sistema suelo-soporte mediante modelaciones numéricas. Los resultados del monitoreo validan los diseños efectuados en gabinete o pueden implicar modificaciones, las que deben ser resueltas rápidamente en obra ya sea por un equipo de especialistas del diseñador en terreno, o pudiendo existir diseños alternativos previstos.

El plan de monitoreo de las deformaciones debe realizarse tanto al interior de la cavidad (monitoreo de convergencia), así como en superficie (monitoreo superficial y sub superficial) y en las edificaciones vecinas de importancia. Las técnicas, instrumentos y dispositivos del monitoreo, así como su distribución espacial y la frecuencia de las mismas deben ser definidas durante la etapa de diseño, pudiendo ser modificadas durante la etapa de construcción de las obras

dependiendo de las condiciones y comportamiento del terreno, las condiciones de borde u otros elementos que alteren o justifiquen dichas modificaciones.

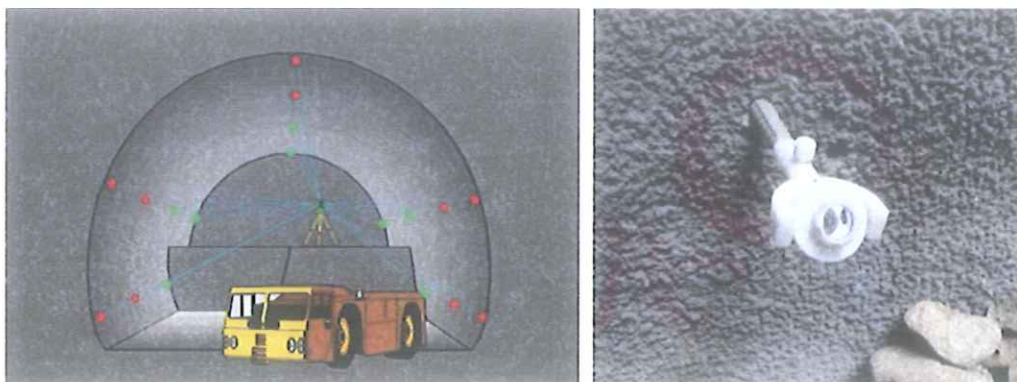


Figura 5. Monitoreo de convergencia al interior del túnel. Disposición y detalle de dispositivos

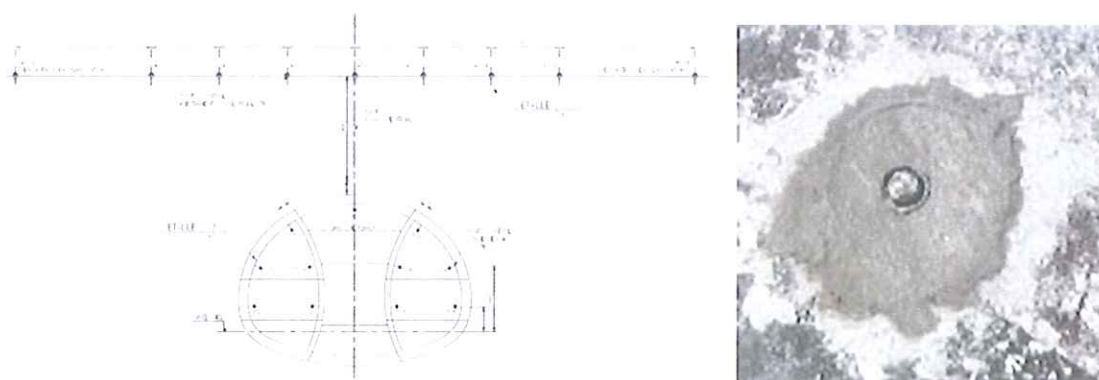


Figura 6. Monitoreo de Superficie: disposición típica en calzadas y detalle de dispositivos



Figura 7. Monitoreo de edificios. Dispositivo típico de monitoreo topográfico (izq.) y sistema electromecánico para medir inclinaciones de fachadas (der.)

De acuerdo a todo lo anterior, el método de excavación según los principios del NATM se traduce finalmente en una secuencia cíclica basada en la excavación, colocación de sostenimiento y monitoreo, tal como lo muestra la figura 8.

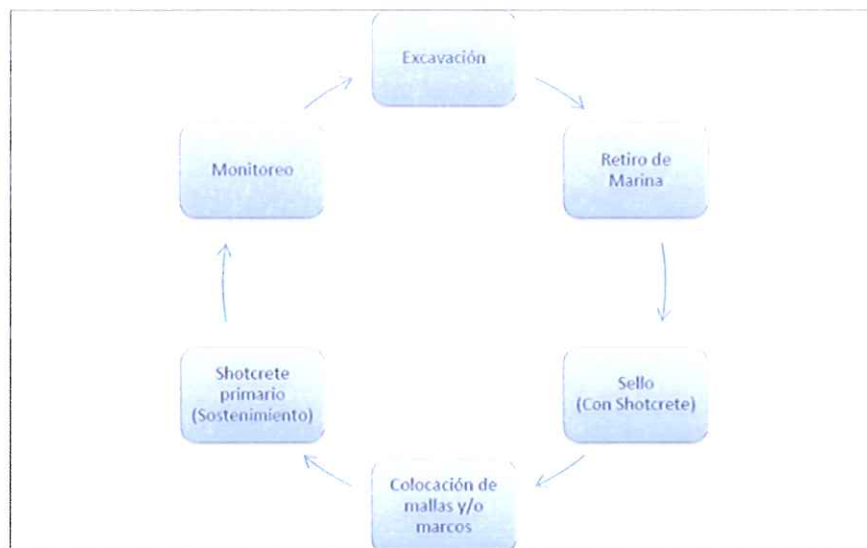


Figura 8. Ciclo de excavación con método NATM

Pasado un tiempo de ejecutada una secuencia de avance, es decir, de excavación, colocación de sostenimiento y monitoreo, las deformaciones del terreno producto de dicho avance, tanto de la cavidad como en superficie, tienden a estabilizarse y converger a un valor predeterminado.

3.5. Revestimiento Secundario

Una vez estabilizadas las deformaciones, se aplica una segunda cáscara, llamada “Revestimiento Secundario”, o simplemente “Revestimiento”, materializada mediante hormigón proyectado con mallas y barras de acero de refuerzo, la que constituye, junto con la primera cáscara, el refuerzo necesario y definitivo para tomar todas las cargas de largo plazo, incluidas las cargas sísmicas.

El espesor de esta capa de hormigón proyectado y la cuantía de acero de refuerzo, ya sea en mallas o barras, surgen de las modelaciones numéricas que se realizan como parte del diseño de los túneles para la condición final, es decir, en donde actúan todas las cargas a las que va a estar sometido el túnel durante su vida útil.

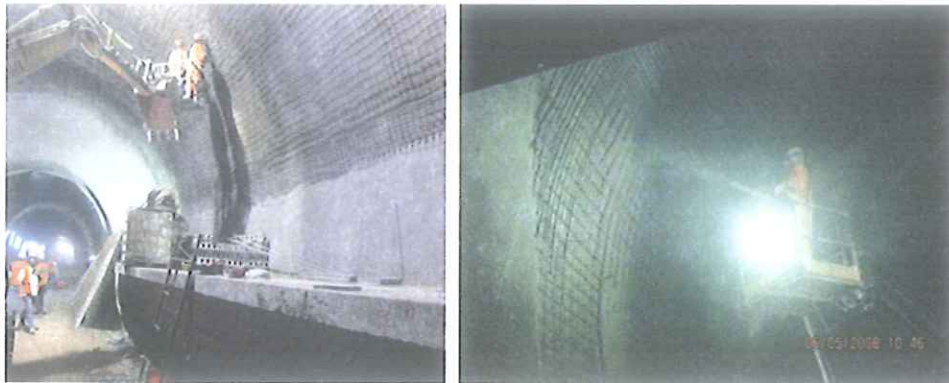


Figura 9. Revestimiento: Colocación de mallas de acero (izq.) y hormigón proyectado (der.)

4. DEFORMACIONES Y CONTROL DE ÉSTAS EN EL MÉTODO NATM

4.1. Marco Teórico-Empírico

Como se ha expuesto previa y reiteradamente, en el método NATM el subsuelo puede y debe ser participe en la función portante alrededor de una cavidad, la cual se logra permitiendo que el subsuelo se deforme y con ello se active la resistencia al corte del mismo.

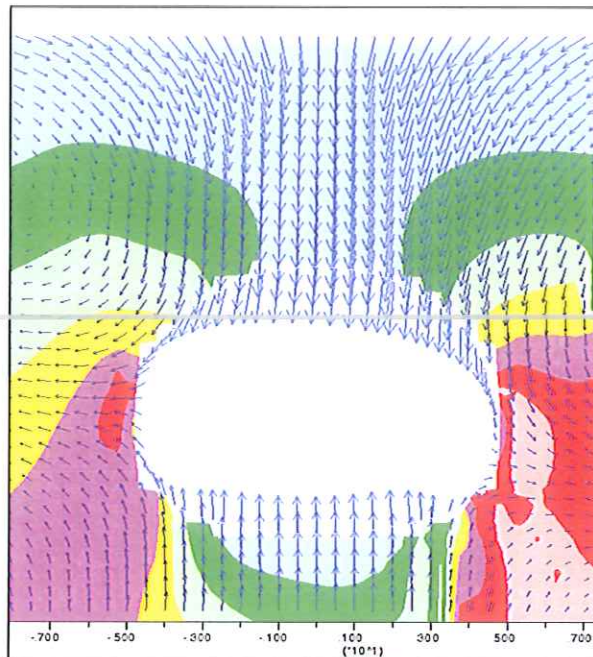


Figura 10. Esquema de deformación del suelo ante una excavación

En la figura 10 se muestra esquemáticamente el movimiento de las partículas de suelo al realizar una excavación en un macizo a una cierta profundidad. De ella se desprende que al interior de la cavidad recién excavada el desplazamiento de las partículas tiende a cerrar la cavidad (convergencia), mientras que en la superficie la deformación del terreno forma una especie de curva de Gauss invertida, en donde la máxima deformación vertical se genera sobre la clave del túnel (punto más alto, en el eje del túnel) y tiende a cero al alejarse del eje del túnel, de manera simétrica hacia ambos lados.

Cabe destacar que en la figura 10 las deformaciones verticales se han magnificado respecto de la escala horizontal de manera de poder observar de mejor modo el fenómeno (las deformaciones verticales están en milímetros, mientras que las distancias horizontales están en metros).

En la figura 11, se muestra cómo se va desarrollando la deformación en la superficie a medida que va avanzando la excavación del túnel. Las curvas se asemejan a la de Gauss invertida y se demuestra que la deformación vertical máxima se produce en el eje del túnel, mientras va tendiendo a cero a medida que se aleja del eje, hacia ambos lados.

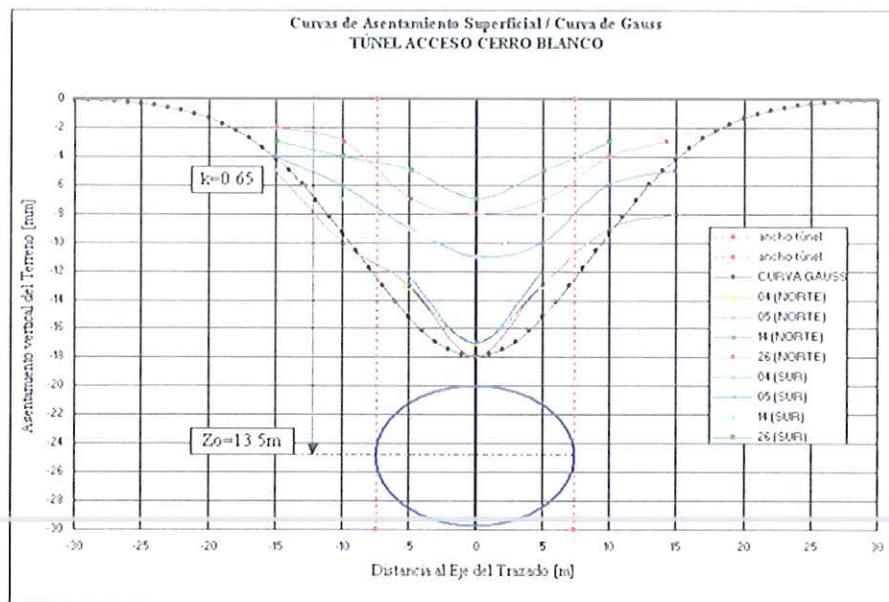


Figura 11. Curvas típicas de asentamiento superficial del terreno por excavación de túnel y su envolvente teórica

De la experiencia empírica-analítica también se desprende que al haber menor distancia entre la clave del túnel y la superficie del terreno (denominada “tapada” del túnel) hay menos material de suelo que permita activar una capacidad auto portante adecuada, por lo que podría haber mayor deformación tanto dentro de la cavidad como en superficie, llegando al extremo que de haber una tapada insuficiente podría no generarse dicha capacidad auto portante convirtiendo a todo el suelo sobre la cavidad en “carga”, llevándolo incluso a colapsar de no haber un revestimiento fuerte que tome dichas cargas.

Como el diseño debe asegurar no generar colapsos, ni deformar el suelo de manera descontrolada, y de modo de aumentar la función portante del suelo, debe proveerse a éste un confinamiento radial lo más rápido posible. Este confinamiento radial inicial se materializa mediante el Revestimiento Primario, o Sostenimiento, definido en el punto 2.3.

De más está decir que la capacidad auto portante y por ende el grado de deformaciones que se registre al realizar excavaciones varía dependiendo directamente del tipo de suelo en que se ejecuten éstas (en Santiago el comportamiento de las gravas atribuibles a depositaciones de los ríos Mapocho y Maipo son diferentes entre sí y totalmente diferentes al que se registra en los finos del oriente y del nor poniente).

4.2. Control de las Deformaciones

De acuerdo a lo anteriormente expuesto, el método NATM permite variadas y diferentes maneras de controlar o minimizar las deformaciones del terreno, algunas de las cuales se indican a continuación:

4.2.1. En etapa de Diseño

- Caracterizar correctamente el terreno en que se van a ejecutar las obras. Se debe disponer oportunamente de todos los parámetros de diseño del suelo necesarios para realizar las modelaciones numéricas.
- Determinar tempranamente la eventual presencia de agua en el sector y si ésta altera y en qué medida los parámetros de diseño del suelo.
- En caso de ser posible, disponer de información de deformaciones del suelo de obras anteriores de manera de calibrar los modelos numéricos de las actuales obras en diseño.
- Buscar el adecuado equilibrio entre el tamaño de la sección transversal del túnel a excavar y la tapada disponible, de manera que se le saque el máximo de provecho a la capacidad auto portante del suelo sobre la cavidad.
- Profundizar el túnel, en especial cuando los estratos más superficiales del suelo sean menos competentes. Con ello se busca tener una tapada mayor y a la vez de un suelo más competente al auto soporte.
- En caso de suelos poco competentes, proveer al suelo de una capacidad de soporte adicional agregando medidas auxiliares como; paraguas de protección; pernos en la frente; inyecciones de consolidación, etc.
- Realizar una modelación numérica con programas de interacción suelo-estructura, de preferencia en tres dimensiones, que represente fielmente los estratos de suelos con sus propiedades geomecánicas y la excavación que se proyecta, con sus respectivas secuencias.

4.2.2. En etapa de Construcción

- Control de la longitud horizontal de excavación o longitud de avance: Como se mencionó anteriormente, esta longitud debe ser previamente definida en función del tipo de suelo, del conocimiento y comportamiento del suelo y de las modelaciones numéricas que se realicen como parte del diseño de los túneles. Esta longitud puede ser variada en obra dependiendo del comportamiento del monitoreo de deformaciones; en caso de mostrar nula a escasa deformación puede aumentarse, y al contrario, en caso de mostrar el terreno deformaciones más allá de las estimadas en la etapa de diseño debe reducirse.
- Excavación cuidadosa del perímetro de la sección transversal del túnel, de manera de evitar impactos al suelo y sobreexcavaciones que implicarán mayor demora en la colocación del soporte primario.
- Colocación rápida del soporte primario (revestimiento primario, o sostenimiento) en la frente recién excavada. Esto, aparte de actuar como medida de seguridad inmediata para el personal frente a desprendimientos eventuales del terreno, confina radialmente la cavidad y le da soporte inmediato al terreno.
- Cierre temprano de anillos: esto es colocar el revestimiento primario en todo el perímetro de un túnel (para túneles de sección circular, semi circular, ovoidal, o similar) de manera de formar un anillo cerrado, que imprima un soporte inmediato más efectivo a la cavidad.
- Reducción de la distancia entre la frente de excavación y el cierre del anillo de refuerzo: Implica no postergar en exceso la ejecución del cierre del anillo tras sucesivos avances de excavación.
- Subdivisión de la frente de excavación: Se realiza con el objeto de disminuir la sección transversal a excavar, de esta manera se controla de mejor forma el comportamiento de la excavación frente a la calidad del terreno y la cobertura o tapada disponible.
- Contar en terreno con un equipo de profesionales del consultor que realizó las modelaciones y diseños de los túneles, quienes estarán encargados de revisar periódicamente los registros del monitoreo de deformaciones y en función de ello, y de singularidades que aparezcan en el avance de las obras, tomen decisiones respecto a cómo seguir avanzando y qué medidas implementar para cumplir con las deformaciones proyectadas. Este equipo se le denomina comúnmente Supervisión de Obra (SDO).

5. CLASIFICACIÓN DE TÚNELES Y SUBDIVISIONES TÍPICAS DE SUS SECCIONES

En general, para las obras del Metro de Santiago, los túneles se clasifican en tres grandes categorías: túneles pequeños, medianos y grandes. Junto con ello, y dado que una de las medidas constructivas más efectivas para reducir las deformaciones es la subdivisión del frente de excavación, es decir, seccionar en partes más pequeñas la sección transversal del túnel a excavar, se detalla a continuación las subdivisiones típicas más utilizadas para cada una de las categorías de los túneles en los suelos de Santiago.

5.1. Túneles pequeños

Los túneles pequeños son aquellos de secciones transversales de hasta 50 m². Para estos túneles, en general utilizan secciones transversales en forma de “herradura”, es decir, con fondo plano, sin completar un anillo perimetral circular u ovoidal. Esto túneles pueden ser excavados a sección completa (full face) en suelos competentes (p.ej. gravas), o eventualmente podrían requerir una excavación parcializada en subdivisiones denominadas bóveda y banco para el caso de suelos menos competentes (p.ej. finos). Donde la “bóveda” es el arco superior del túnel, que va aproximadamente entre el eje del ecuador del túnel hasta la clave del mismo, mientras que “banco” se denomina al sector medio del túnel que contiene los hastiales, generalmente bajo el ecuador del túnel.

En caso de suelos muy poco competentes, o en sectores que requieran de un estricto control de las deformaciones, o para túneles que estén sometidos a altas cargas por construcciones u operaciones vecinas, podría requerirse cerrar el anillo y completar la forma circular, agregando bajo el banco una sección denominada “contrabóveda”, que es la que cierra el círculo de la sección transversal.

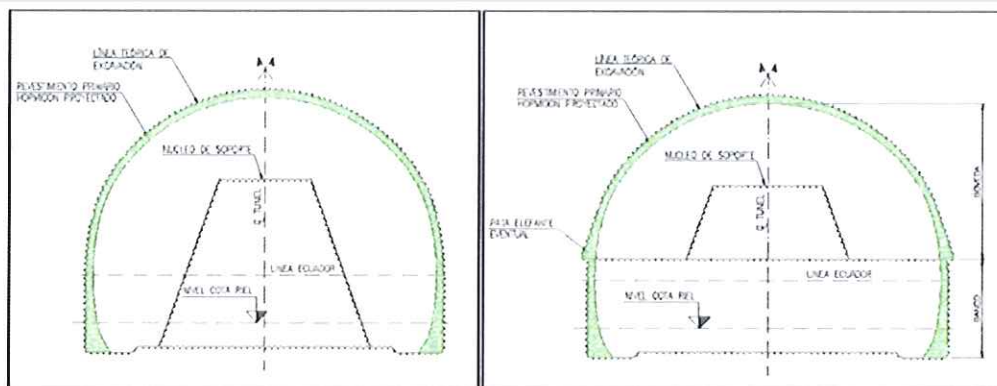


Figura 12. Secciones típicas de túneles pequeños

Los túneles de sección pequeña son utilizados en Metro mayormente para galerías de acceso y de conexión peatonales, como para ductos de ventilación y cables.

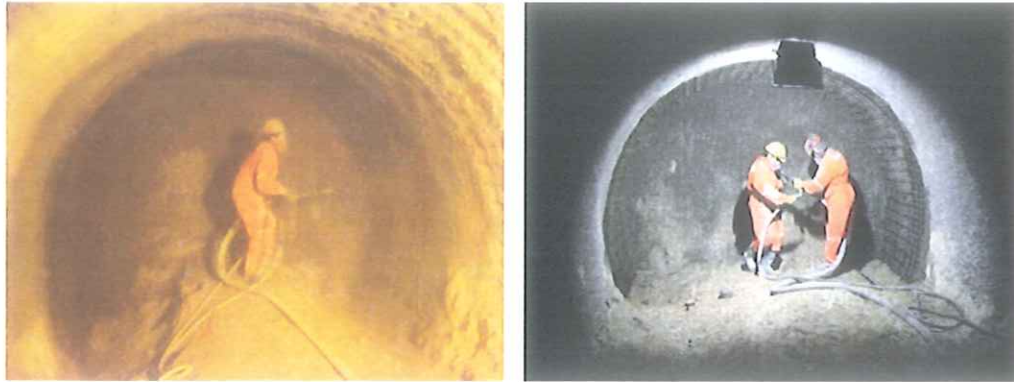


Figura 13. Túneles pequeños

5.2. Túneles medianos

Los túneles de sección mediana son aquellos de secciones transversales de entre 50 m² a 100 m². Para estos casos, la sección se subdivide generalmente en tres subsecciones; bóveda, banco y contrabóveda. Para el caso de suelos muy competentes es posible ejecutar túneles de estas dimensiones con forma de herradura, es decir, sin contrabóveda, o realizar excavaciones a frente completa, full face, o subdividir la frente en bóveda+banco y contrabóveda, ahorrándose así una etapa de excavación.

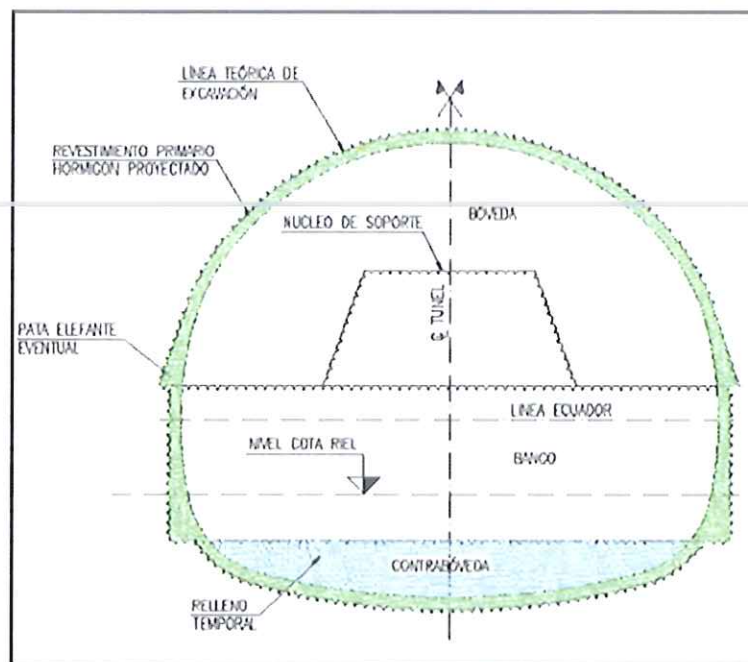


Figura 14. Sección típica de túneles medianos

Para la subdivisión bóveda, banco, contrabóveda, la secuencia consiste en excavar y sostener anticipadamente algunos avances en bóveda, posteriormente ejecutar algunos avances del banco, por detrás de las bóvedas, para finalmente ejecutar una contrabóveda detrás de los bancos. Al finalizar esta etapa, se ha materializado en el avance de la contrabóveda un anillo de cierre que rigidiza y estabiliza la cavidad.

A continuación se detalla una secuencia típica de excavación de un túnel en sub fases de bóveda, banco y contrabóveda. Cabe mencionar que dependiendo del tipo de suelo y del comportamiento de las deformaciones, la secuencia puede variar y ser a su vez modificada en terreno por personal del diseñador instalado en obra.

SECUENCIA EXCAVACIÓN TUNELES CICLO ESTANDAR:

1. 1° BOVEDA
2. 1er BANCO
3. 2° BOVEDA
4. 2° BANCO
5. CONTRABOVEDA

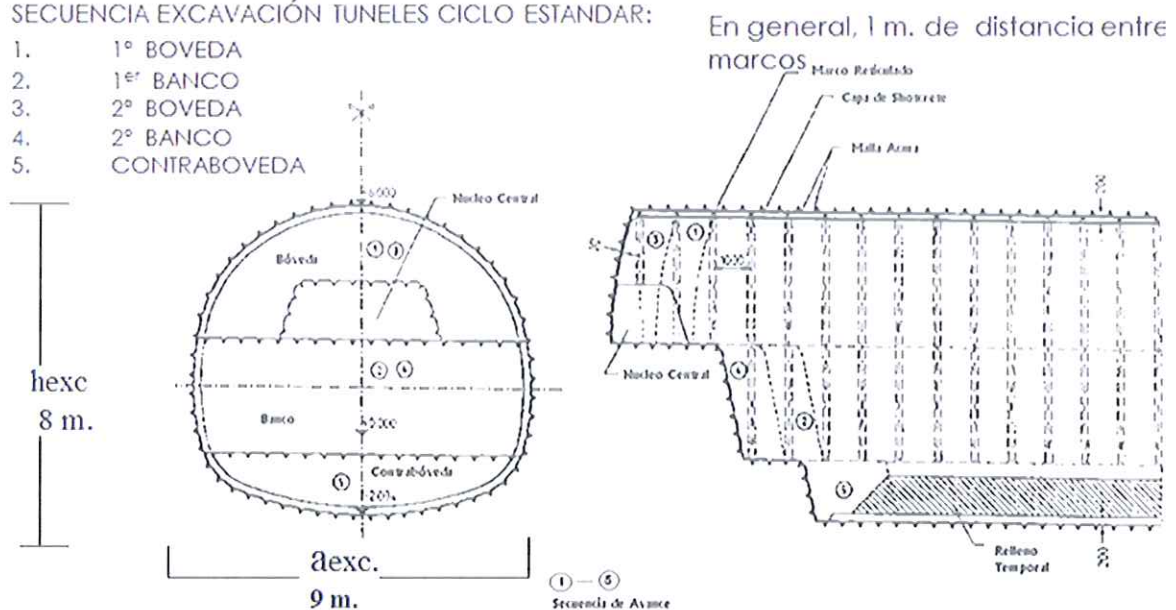


Figura 15. Secuencia típica de excavación y sostenimiento de túnel mediano

En la secuencia mostrada en la figura 15, se excava y sostiene en primer lugar la bóveda (1), luego el banco (2), se avanza nuevamente en bóveda (3) y se ejecuta una nuevo avance en el banco (4). Luego de realizados estos 4 avances, se ejecuta la contrabóveda (5), con lo cual se genera el cierre del anillo. De esta manera, desde el avance en contrabóveda hacia atrás ya hay una cáscara estructural configurada que estabiliza la excavación y las deformaciones comienzan a estabilizarse.



Figura 16. Túneles medianos. Etapa bóveda - banco (izq.), etapa contrabóveda (der.)

Los túneles de sección mediana son utilizados en Metro principalmente para el túnel interestación, o túnel vía entre estaciones, para galerías que albergan los sistemas de ventilación y para galerías auxiliares (túneles SER, túneles de acopio de marina, etc.)

5.3. Túneles grandes

Los túneles grandes son aquellos túneles de secciones transversales mayores a 100 m². Para estos casos y dadas sus dimensiones, se utilizan variadas subdivisiones, entre las que mencionamos; side drift simple (muro central) y side drifts dobles (doble muro laterales); side drifts con contrabóveda temporal; galerías de cimentación; sección binocular, etc. Cada una de ellas pudiendo subdividirse a la vez en etapas de bóveda, banco y contrabóveda, todo esto con el objetivo de mantener controladas las deformaciones y la probabilidad de falla por la frente. Los muros de los side drifts y las contrabóvedas temporales se van demoliendo a medida que se avanza con el revestimiento definitivo del túnel, situación que ocurre una vez que se registra una velocidad de deformación prácticamente nula, lo que da cuenta de deformaciones estabilizadas.

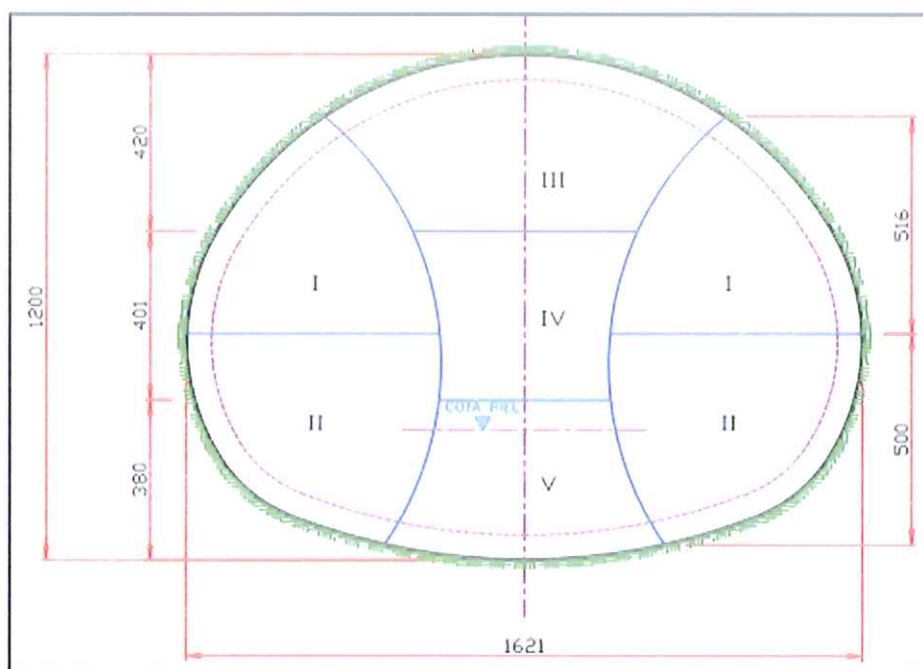


Figura 17. Sección típica de túneles grandes (con doble side drift)



Figura 18. Túneles grandes: side drift simple (izq.), side drift doble (der.)



Figura 19. Túneles grandes: túnel binocular (izq.), galerías de cimentación (der.)



Figura 20. Túneles grandes: túnel estación terminado en etapa de revestimiento

Los túneles de grandes secciones se utilizan en Metro principalmente para los túneles de estaciones, o túneles de andenes, galerías de acceso a estaciones, galerías secundarias de estaciones y galerías de acceso al túnel Interestación.

6. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES EN ENTORNOS URBANOS

6.1. Etapa de Diseño

Cuando el trazado de una línea va bajo sectores densamente poblados y con presencia de importantes edificios habitacionales, comerciales y especialmente edificios que tienen carácter de históricos o patrimoniales, como lo fue el paso de la Línea 3 bajo el eje San Diego – Bandera, en el centro de Santiago, se deben extremar las precauciones y tomar todas las medidas para que las deformaciones inherentes al método NATM no tengan efectos sobre estas construcciones.

En primer lugar, se debe conocer y caracterizar correctamente el suelo en el que se desarrollaran las excavaciones. En función de ello, se debe buscar el equilibrio entre la calidad del suelo y la profundidad a la que se va a proyectar el túnel, de manera de lograr una tapada adecuada que permita el mejor desempeño del suelo en cuanto a su capacidad auto portante.

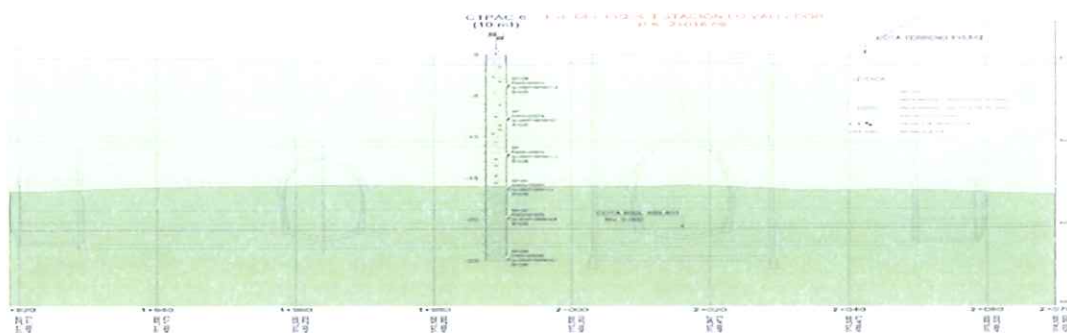


Figura 21. Perfil estratigráfico del sector de proyecto

Se debe modelar numéricamente, de preferencia tridimensionalmente, la situación del suelo, utilizando para ello programas de interacción suelo-estructura. Cada estrato de suelo, con sus espesores y propiedades, debe quedar correctamente ingresado en el modelo.

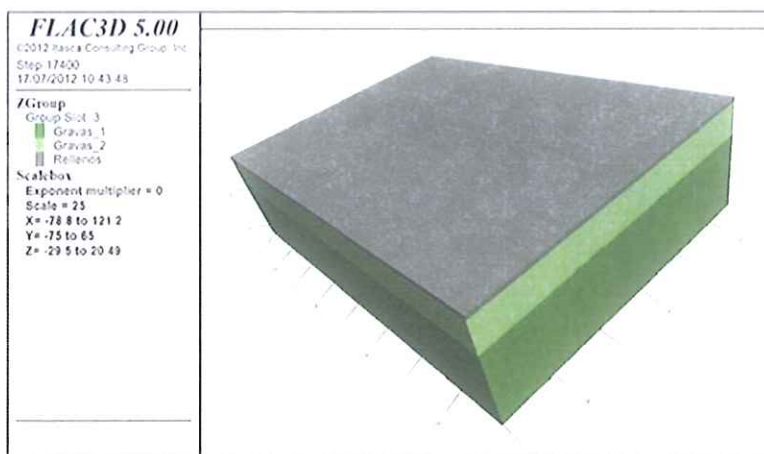


Figura 22. Modelo 3D del suelo, según perfil estratigráfico

Se debe incorporar al modelo tridimensional la morfología de la estructura a excavar, con sus secuencias de excavación bien definidas para cada una de sus partes y etapas que la componen (en la figura 23, se incorporó el pique de excavación, las galerías de accesos, el túnel estación y los túneles Interestación).

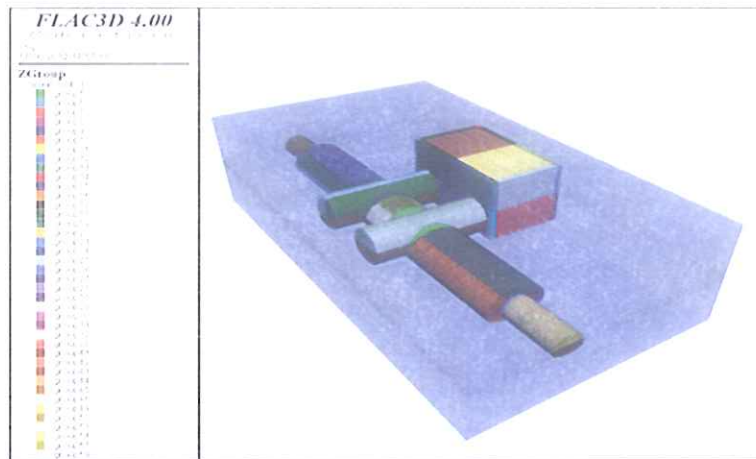


Figura 23. Modelo 3D, con obras a ejecutar y secuencias de excavación

Finalmente, se procesa el modelo, de preferencia previamente calibrado con datos de deformaciones reales producidas por excavaciones anteriores o similares (si es que existe dicha información), el cual, además de entregar las tensiones de diseño de cada uno de los elementos estructurales que componen la obra civil, entrega una estimación de las deformaciones que se producirán para cada avance de las secuencias ingresadas.

6.2. Etapa de Construcción

Durante la construcción, se debe considerar un plan de monitoreo de las deformaciones, que permita llevar un exhaustivo control de las excavaciones con el objeto de reducir al mínimo los asentamientos del terreno. Este plan de monitoreo será la base para la activación del Plan de Acción requerido en caso de detectar la generación de algún tipo de deformación más allá de las previstas en la fase de diseño.

A continuación, se describe el procedimiento a seguir para la realización del Plan de Monitoreo.

6.2.1. Plan de Monitoreo

Para elaborar el plan de monitoreo, se considerarán como base los planos de monitoreo, los cuales muestran en detalle los lugares específicos donde se realizarán las mediciones establecidas en el plan y el tipo de instrumentos de medición que se instalarán.

6.2.2. Planos de Monitoreo

Estos planos muestran las secciones de monitoreo que serán instaladas en todo el trazado de la línea, tanto en superficie como al interior del túnel, para así realizar un debido control de los asentamientos presentados producto de las obras de excavación (túneles).

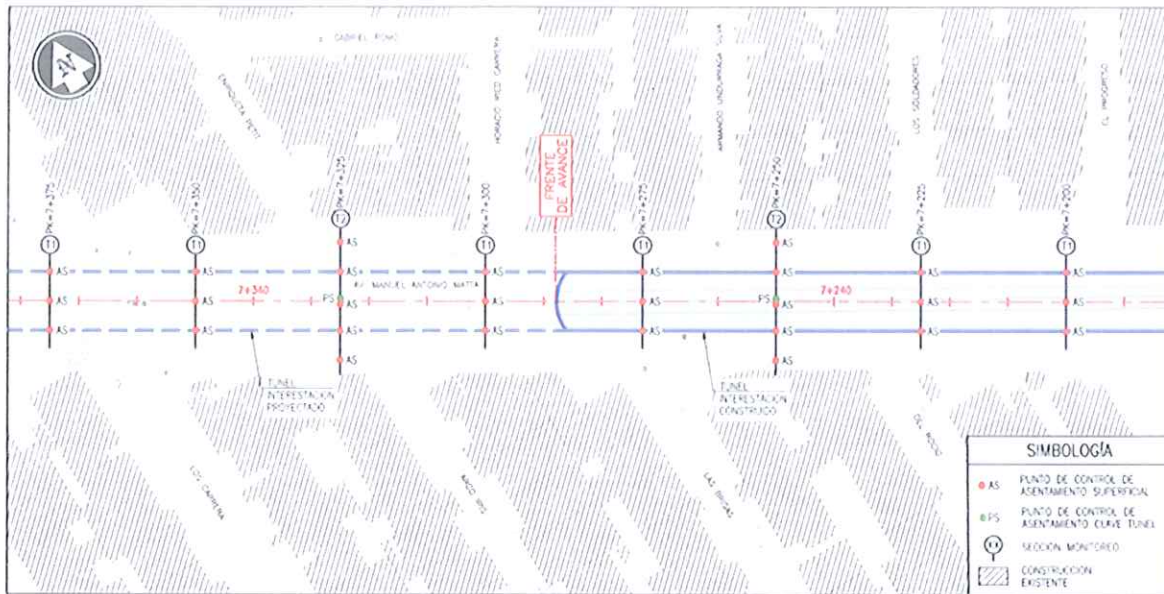


Figura 24. Planta tipo de Monitoreo

6.2.3. Instrumentos de Monitoreo

Para realizar las mediciones, se requieren instrumentos de monitoreo, que entregan información sobre las deformaciones que se presentan en el suelo (AS, PS y PI), Túnel (PC) y edificios (AE) producto de las obras de excavación. A continuación se presenta a modo de ejemplo una sección tipo de los puntos de monitoreo. Estos instrumentos son instalados por el constructor y es de su responsabilidad mantenerlos visibles y operativos en todo momento. No requieren calibración, ya que la medición que realizan consiste en la toma de puntos que son leídos por equipos de topografía de alta precisión los cuales si requieren de calibración.



Los datos obtenidos de terreno serán analizados e informados a través de reportes diarios y mensuales de Monitoreo. Estos informes darán cuenta de los asentamientos presentados por el suelo y las edificaciones cercanas a las obras de excavación.



6.2.5. Valores de Control

Durante el desarrollo de la obra se establecerán valores de asentamiento o “umbrales” que permitirán verificar si la construcción de los túneles se está desarrollando de acuerdo a lo establecido en la etapa de diseño. Para ello es necesario definir la nomenclatura base de trabajo:

Valor Esperado:

También conocido como valor “calculado”, corresponde al valor obtenido directamente de los modelos geotécnicos desarrollados por la ingeniería en la etapa de diseño. Se destaca que este valor no representa una condición límite. Es el resultado del diseño de las excavaciones y los túneles.

Valor Medido:

Es el valor medido durante el monitoreo de las obras. Se asume que su valor máximo es muy próximo al valor de cálculo para condiciones normales de trabajo y del terreno. Justamente el monitoreo se realiza para detectar desviaciones de este valor respecto del esperado.

Valor de Control

Se denomina Umbral de control al valor que permite predecir el Valor Esperado o Calculado, a través de una proyección o tendencia en el tiempo. Este umbral permite evaluar con cierta anticipación si la tendencia es la esperada o no, de manera de poder tomar decisiones con la debida anticipación. El concepto que este umbral tiene es que “evalúa la tendencia”, esto es el aumento de deformación hasta asintotizar a un valor constante o por el contrario creciente con el tiempo, es incluso más importante que medir los valores absolutos”.

Se espera que el valor medido supere el umbral de control, pero siguiendo una tendencia tal que se estabilice asintóticamente al valor esperado, de lo contrario se deberá evaluar la situación y se deberá tomar las acciones que corresponda según sea el caso.

Valor de Alarma

Como ya se explicó, la superación del valor esperado no implica una condición límite, aunque si implica que el modelo no logró reflejar la realidad. Por ello, se hace necesario definir un nuevo concepto contra el cual compararse. Denominaremos valor de alarma cuando se aleja del valor calculado, o se aproxima al límite máximo admisible de serviciabilidad de la obra.

Durante la obra se estudiará la tendencia del valor medido para que no supere el umbral de alarma. Si la tendencia es a superarlo se deberán tomar las medidas que sean necesarias para que la tendencia de los asentamientos no supere este valor.

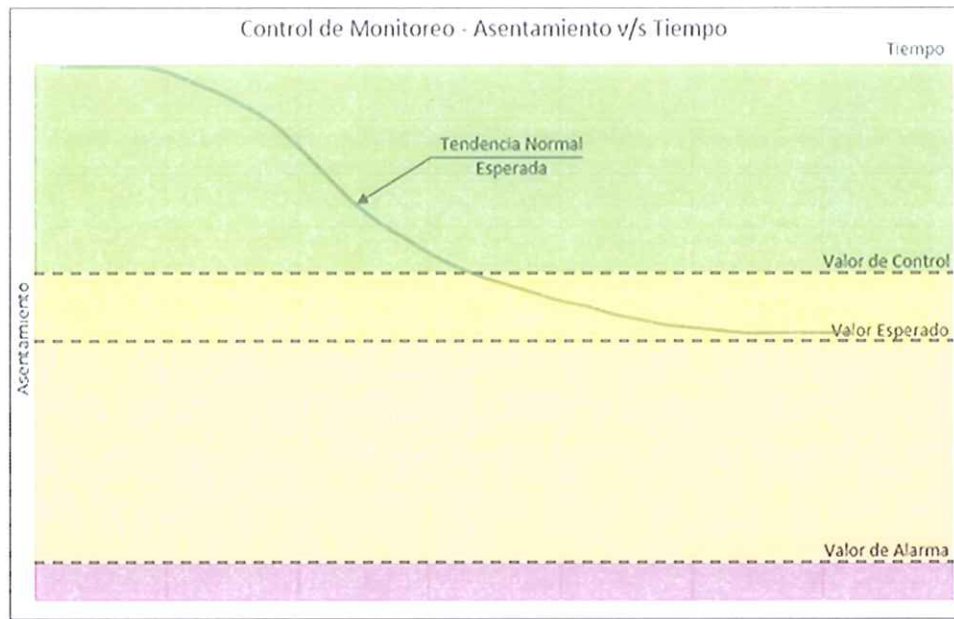


Figura 27. Curva de Tendencia Normal Esperada de un punto específico de Monitoreo

Es necesario destacar que estos valores no son únicos para toda la obra, ya que dependen principalmente del tipo de suelo, tamaño y profundidad del túnel; por lo tanto al inicio de la obra se deberán establecer estos umbrales para cada condición particular, los cuales serán de conocimiento de todos los profesionales que participarán de la obra como ingenieros diseñadores, supervisores, inspectores y constructores, de manera que todos puedan llevar un control de la seguridad de la obra.

6.3. Plan de Acción ante Deformaciones

Durante el desarrollo de la obra se definirá un equipo de profesionales capacitados para llevar un control del desempeño de la obra y con la autoridad necesaria para tomar acciones inmediatas en caso de ser necesario. Este equipo estará conformado principalmente por los ingenieros de Metro destinados en terreno a cargo de dirigir la construcción de los túneles, y los propios ingenieros supervisores de obra (SDO) que participaron del diseño y por lo tanto cuentan con todo el conocimiento teórico que respalda el proyecto. Este equipo de profesionales llevará un control diario de los asentamientos del terreno circundante a las excavaciones, con el objetivo de anticipar las acciones a eventuales deformaciones excesivas que eventualmente pudieran ocasionar daños al entorno, tales como edificaciones cercanas, o incluso fallas locales o generales en los frentes de excavación de los túneles.

Por lo tanto el Plan de Acción a seguir será el siguiente:

- a) Análisis diario de los asentamientos.
- b) Control que los asentamientos se mantengan dentro de los rangos admisibles definidos en el Proyecto (“Valores Umbrales”).
- c) En caso de superar los valores de asentamiento esperados se deberá procurar que estos no lleguen a valores cercanos a los valores o umbrales de alarma, para ello se deberá tomar algunas medidas tales como:
 - Disminuir la longitud de avance de las excavaciones con lo cual se consigue disminuir los asentamientos.
 - Colocar marchiavantis en el avance para evitar sobre excavaciones en el techo del túnel.
 - Colocar pernos de fibra y/o uso de contrafuertes temporales de terreno natural con el objetivo de asegurar la estabilidad de la frente del túnel.

6.4. Verificación de Afectación de las Deformaciones a Edificios Vecinos

Una vez terminadas las faenas de tuneleado, y estabilizadas ya las deformaciones del suelo, se obtiene del registro del monitoreo de las deformaciones una “cubeta de subsidencias”, o isolíneas de deformación vertical, como la mostrada en la figura 28, en donde se observa hasta qué punto las deformaciones afectan a los edificios vecinos y en qué magnitud.



Figura 28. Cubeta de subsidencias

De la figura 28, y retomando el ejemplo de la situación modelada, figura 23, se desprende que las máximas deformaciones verticales se producen en la intersección entre las galerías de acceso y el túnel estación (zonas de cruces o entronques). Desde esos puntos de máxima deformación vertical, éstas van disminuyendo al alejarse de dichos cruces de túneles hasta llegar a cero a cierta distancia de las obras.

Determinados los valores de asentamientos de los edificios del entorno, en especial de sus asentamientos diferenciales, o distorsión angular, se realizan análisis comparativos con normas y recomendaciones internacionales para el caso específico de edificios históricos o patrimoniales. También, en caso de ser necesario, se realizan modelaciones numéricas de éstos sometidos a dicha distorsión angular para comprobar que no se les afecta negativamente desde el punto de vista estructural.

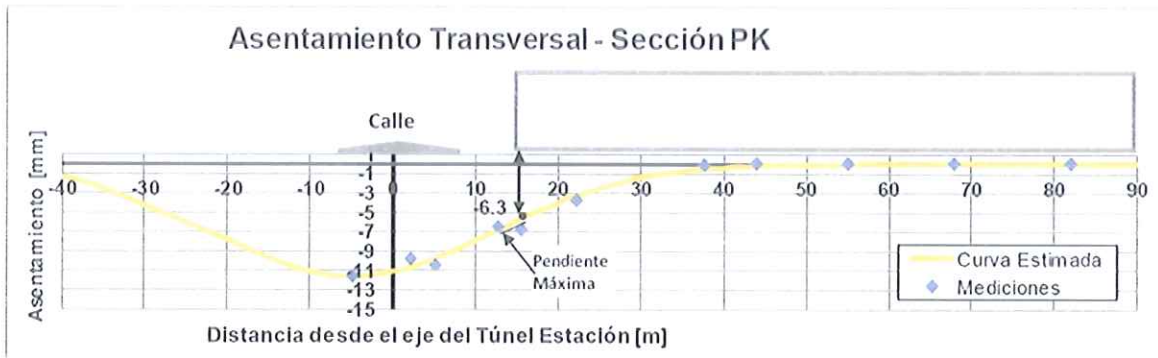


Figura 29. Ejemplo de Asentamiento Transversal de Edificio

La figura 29 corresponde a un ejemplo de los asentamientos que la construcción de un túnel puede ocasionar a un edificio vecino a su eje. Tal como se observa en el ejemplo, la deformación vertical máxima se produce en el eje del túnel, bajo la calle, y es del orden de los 11 mm. La curva de deformaciones tiene, tal como se dijo anteriormente, una forma de curva de Gauss invertida, y a los 40 m aprox. desde el eje del túnel la deformación vertical llega a cero. El asentamiento máximo que se le provoca al edificio que está a aprox. 15 m de distancia horizontal al eje del túnel es de 6.3 mm. Por lo tanto, la distorsión angular que se le provoca al edificio es de $6.3/(40.000-15.000) = 1/3968$.

Independiente del material de construcción del edificio en estudio, y de su antigüedad, diversas normativas y códigos internacionales indican que para distorsiones angulares menores a $1/1000$ no se producen daños estructurales al edificio y por lo tanto no hay mayor afectación al mismo.

En el caso particular de Línea 3, el trazado se proyectó a mucha profundidad (cota de riel aproximada -28 m) en parte obligado por el paso de esta línea bajo las estaciones Cal y Canto de Línea 2 por el norte, y bajo la estación Universidad de Chile de Línea 1 por el sur (en un sector donde además la Línea 1 pasa debajo del paso nivel existente en el eje San Diego – Bandera).

El ir a esas profundidades implicó además estar inmersos en un suelo muy competente, como lo es la grava de la primera depositación del río Mapocho.

El ir a esas profundidades y con la calidad de suelo en ese entorno ya era garantía de buen comportamiento de las excavaciones subterráneas en relación con las deformaciones en superficie. Sin embargo, de manera de no afectar negativamente a los edificios, especialmente a los patrimoniales existentes en el sector, se decidió ir con túnel Interestación con contrabóveda y con un cierre del anillo de sostenimiento muy cerca del frente. Para el caso de las estaciones, aparte de la subdivisión en doble side drifts, se agregaron sistemas de sostenimiento adicional para controlar las deformaciones, consistentes en pernos de fibra de vidrio en la frente.

En resumen, durante el diseño de las obras subterráneas, se estiman las deformaciones superficiales e interiores que se esperan cuando las obras ya hayan sido ejecutadas. En el caso de las deformaciones superficiales, se estiman también las deformaciones que experimentarán las estructuras circundantes.

En el caso del Metro de Santiago, las deformaciones que experimentan las estructuras circundantes han sido comparadas con los límites que establece la norma española de referencia “NBE-AE-88 Acciones en la Edificación”, que para edificaciones de carácter monumental, establece una deformación máxima de 25 mm, en la medida que la distorsión angular de la base de la edificación no sea superior a 1 mm de deformación vertical por cada metro de la estructura en la horizontal (1/1000). La razón de utilizar los límites de deformaciones de la normativa española en el caso del Metro de Santiago, reside en las similitudes constructivas y patrimoniales entre Chile y España.