

# ALGUNOS PROCEDIMIENTOS CONSTRUCTIVOS PARA LA EJECUCIÓN DE TÚNELES URBANOS

Alejo O. Sfriso

UBA, AOSA SRL y VS Consultores SA.

Rivadavia 755 2° 10°, Buenos Aires. asfriso@members.asce.org.

## RESUMEN

Se presentan algunas experiencias adquiridas en el proyecto de procedimientos constructivos para túneles pertenecientes a la ampliación de la red de subterráneos de Buenos Aires, líneas A, B y H. Se incluye una caracterización de la formación Pampeano para obras de tunelería y la descripción de los procedimientos constructivos empleados, con comentarios acerca de sus ventajas, desventajas y oportunidades de optimización futura.

## ABSTRACT

Subterráneos de Buenos Aires has expanding it's metro network, extending Lines A and B and building the new Line H. Many lessons were learned during the design of the construction procedures for these tunnels, some of them being presented here. A characterization of the Pampeano formation for tunneling is briefed, and the construction procedures, their advantages and shortcomings and opportunities for future improvement are discussed.

## PALABRAS CLAVE

Túnel, Excavación subterránea, Procedimiento constructivo, Formación Pampeano.

## 1. INTRODUCCIÓN

La Ciudad de Buenos Aires comenzó en 1998 un importante programa de extensión de las líneas de Subterráneos. Hasta el presente se construyeron o se están construyendo unos cuatro kilómetros de túnel y cuatro estaciones en la Línea B, unos cuatro kilómetros de túnel y cuatro estaciones en la Línea A, y unos cinco kilómetros de túnel y siete estaciones en la línea H. El programa continúa a futuro con la extensión de las líneas E y H y la construcción de nuevas líneas, hoy en etapa de anteproyecto (SBASE 2006).

Los procedimientos constructivos han ido mejorando a lo largo de los años. Los hitos más significativos son: i) introducción del hormigón proyectado, año 1998; ii) túnel por método belga, año 2000; iii) programa de monitoreo sistemático, año 2002, y iv) excavación a sección completa, año 2004. Todos estos avances fueron acompañados por el desarrollo y calibración de técnicas analíticas y numéricas de diseño y análisis geotécnico (Bolognesi 1991, Núñez 1996, Sfriso 1996, Sfriso 1998, Núñez 2000).

Esta importante continuidad de obras permitió la acumulación de una interesante experiencia acerca del comportamiento de los diferentes métodos constructivos para tunelería aplicados al Pampeano. En esta contribución se vuelcan algunas de las conclusiones principales obtenidas luego de estos ocho años de experiencia en el diseño de procedimientos constructivos y su modelización numérica, y se reproducen las experiencias comunes obtenidas durante la construcción de las obras.

## 2. DESCRIPCIÓN DE LOS PROCEDIMIENTOS CONSTRUCTIVOS

Los elementos de un túnel son la bóveda, los hastiales y la solera. Todos estos elementos pueden ser construidos en una única etapa, con todo el espesor de hormigón y armaduras definitivas, o en dos etapas. En este último caso la primera etapa se ejecuta cerca del frente y tiene como función principal el sostenimiento del suelo en el corto plazo. La segunda etapa, de terminación, se ejecuta dentro de un túnel limpio y seco, y por lo tanto tiene mejor calidad. Con frecuencia se exige que el análisis estructural del túnel se efectúe tomando en cuenta únicamente el revestimiento de segunda etapa.

Los métodos constructivos difieren en el orden en que se construyen los diferentes elementos del túnel y en cuantas etapas se divide cada uno. Descriptos de manera sucinta, los métodos de tunelería usados en el subterráneo de Buenos Aires son:

- Método Alemán (Línea B, 1998-2000): i) se construyen los hastiales definitivos con hormigón moldeado y longitud de veinte a cuarenta metros; ii) se construye la bóveda primaria con hormigón proyectado y avances de uno a dos metros; iii) se construye la bóveda secundaria con hormigón moldeado y avances de cuatro a seis metros; y iv) se construye la solera con hormigón moldeado y longitud de cinco a ocho metros.
- Método Belga (Líneas H y A, 2000-2006): i) se construye la bóveda primaria con hormigón proyectado y avances de uno a dos metros; ii) se construye la bóveda secundaria con hormigón moldeado y longitud de cuatro a seis metros; iii) se construyen los hastiales definitivos con hormigón moldeado y longitud de dos a tres metros; y iv) se construye la solera con hormigón moldeado y longitud de cinco a ocho metros.
- Frente completo (Línea B, 2004-2006): i) se construye la bóveda y hastiales primarios con hormigón proyectado y avances de uno a dos metros; ii) se construye la solera con hormigón moldeado y longitud de cinco a ocho metros. iii) se construye la bóveda y hastiales secundarios con hormigón moldeado y longitud de cuatro a seis metros.



Fig. 1. Túnel Línea B, método alemán, 1999.



Fig. 2. Túnel Línea H, método belga, 2002.



Fig. 3. Túnel Línea B, frente completo, 2005.

En la Fig. 1, método alemán, se aprecian los hastiales en hormigón moldeado y la bóveda con hormigón proyectado. En la Fig. 2, método belga, la bóveda tiene el revestimiento de hormigón moldeado que cubre el hormigón proyectado de primera etapa y se aprecia la excavación de banco previa a la construcción de hastiales. En la Fig. 3, método de frente completo, se aprecia que la excavación de la bóveda y los hastiales se ejecutan juntas, ambas en hormigón proyectado.

### 3. CARACTERIZACIÓN DEL PAMPEANO PARA OBRAS DE TUNELERÍA

Los suelos de la Ciudad de Buenos Aires han sido descriptos en otras contribuciones (Bolognesi 1975, Fidalgo 1975, Núñez 1986, Núñez 1986b). El perfil típico del centro de la Ciudad es:

- Relleno superficial (superficie á 1 m - 3 m de profundidad), formado por arcillas de baja plasticidad medianamente compactas, descomprimidas.
- Pampeano superior (1 m - 3 m á 8 m – 12 m de profundidad), formado por limos y arcillas de mediana plasticidad compactos con nódulos calcáreos en matriz pobremente cementada.
- Pampeano medio (8 m – 12 m a 25 m – 30 m de profundidad), formado por limos y arcillas de mediana plasticidad duros, con matriz mediana a fuertemente cementada, fisurados.
- Pampeano inferior (25 – 30 m a 36 – 40 m), formado por arcillas de mediana y alta plasticidad compactas, pobremente cementadas, fisuradas y probablemente cizalladas.

Las técnicas de investigación de campo y laboratorio son las rutinarias en la Ciudad de Buenos Aires: SPT, recolección de muestras representativas, y ensayos triaxiales no consolidados y no drenados sobre muestras obtenidas con el sacamuestras de 2 1/2". A esta práctica se le agrega la ejecución de algunos ensayos de carga en placa y presiómetros Menard.

Entre los mencionados, el ensayo de carga en placa es el que mejor resultado ha brindado hasta el presente. Permite la medición directa del coeficiente de reacción de la subrasante y una estimación razonablemente precisa del módulo de Young no drenado. Recientemente (Sfriso 2006) se desarrolló un equipo hidráulico computarizado que permite la ejecución de dos ensayos simultáneos de carga en placa en paredes opuestas de un pozo. En la Fig. 4 se muestra el equipo y un resultado. El ajuste relativamente bueno que puede observarse entre las mediciones experimentales y el modelo hiperbólico es típico de estos ensayos.

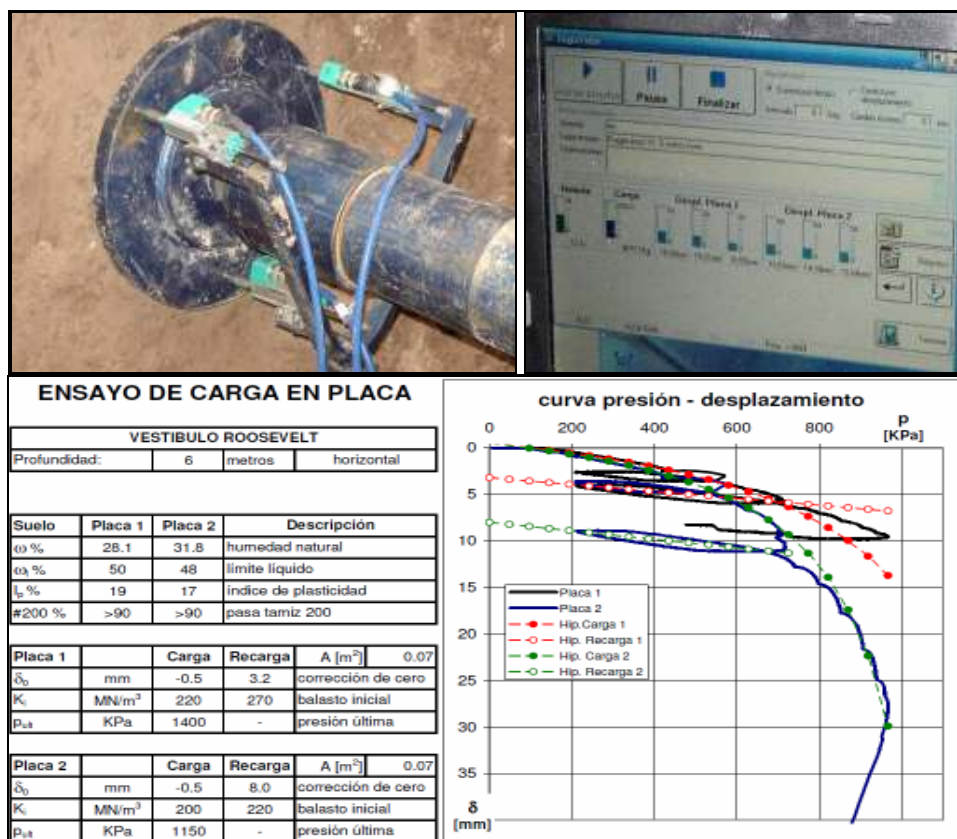


Fig. 4. Ensayo de carga en placa: sistema de adquisición de datos y un resultado, Línea B, 2006.

La fuente principal de datos para la calibración de parámetros mecánicos y técnicas de modelización es la medición, observación y análisis inverso del comportamiento del terreno durante la construcción de las obras. En la Tabla 1 se presentan los rangos de parámetros materiales resultantes de ese proceso de calibración. El significado de los diferentes parámetros puede deducirse de las expresiones (1) (Vermeer 1998).

Tabla 1. Parámetros mecánicos típicos.

	unidad	Relleno		Superior		Medio		Inferior	
		min	max	min	max	min	max	min	max
$c_u$	KPa	20	50	50	100	110	220	40	80
$\phi_u$	°	8	15	10	20	5	20	0	5
$c'$	KPa	0	5	10	25	25	50	15	30
$\phi'$	°	28	30	28	31	30	34	28	31
$\psi$	°	0	0	0	3	0	6	0	3
$E_{50\text{ ref}}$	MPa	10	20	60	100	75	150	60	100
$E_{ur\text{ ref}}$	MPa	25	50	150	250	180	300	140	200
$m$	-	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
$\nu$	-	0.20	0.20	0.30	0.30	0.30	0.30	0.35	0.35
$R_f$	-	0.85	0.85	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90

$$E_{ur} = E_{ur}^{ref} \left( \frac{\sigma_3 + c \cot[\phi]}{c \cot[\phi] + p_{atm}} \right)^m \quad E_{50} = E_{50}^{ref} \left( \frac{\sigma_3 + c \cot[\phi]}{c \cot[\phi] + p_{atm}} \right)^m$$

$$\sigma_1 - \sigma_3 = 2E_{50} \left( 1 - R_f \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_3 N_\phi + 2c\sqrt{N_\phi}} \right) \varepsilon_1 \quad (\text{carga}) \quad (1)$$

$$\sigma_1 - \sigma_3 = E_{ur} \varepsilon_1 \quad (\text{descarga})$$

$$\dot{\varepsilon}_v^p = \sin[\psi] \dot{\gamma}^p$$

Los suelos atravesados por los túneles están sobreconsolidados por desecación con una presión equivalente de tapada de al menos 1 MPa. Se estima que el coeficiente de empuje en reposo está en el rango  $K_0 = 0.55 - 0.70$  en los primeros ocho metros de la formación y  $K_0 = 0.65 - 0.80$  para mayores profundidades. Estos rangos no están bien medidos ni delimitados, por lo que la práctica actual incluye un análisis de sensibilidad a  $K_0$  y el dimensionamiento estructural para los resultados más desfavorables (Núñez 1986, Núñez 1986b, Bolognesi 1991).

Existen tres características particulares de la formación que deben ser tenidas en cuenta en el diseño de obras subterráneas. Estas son:

- El Pampeano está fisurado y tiene algunas lentes de comportamiento cuasi friable. Esta circunstancia obliga a la colocación de un sostenimiento de primera etapa cerca del frente, que evite la formación de chimeneas o sobre-excavaciones de clave (Núñez 1986, Bolognesi 1991, Núñez 2000).



- Los materiales drenan a una velocidad compatible con la construcción del túnel, por lo que los análisis puramente no drenados son poco relevantes para el diseño. La permeabilidad, medida en ensayos de bombeo o calculada como análisis inverso de caudales obtenidos en bombas permanentes cae en el amplio rango  $k = 5 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 10^{-3} \text{ cm/s}$ .
- El Pampeano inferior, no expuesto a desecación (Fidalgo 1975, Núñez 1986) y con cementación calcárea pobre o ausente, tiene un comportamiento poco seguro cuando se excavan en él largas galerías sin sostenimiento. El elevado estado tensional al que está sometido, la fisuración pre – existente, la cementación pobre y el flujo de agua hacia el interior de las galerías produce inestabilidades locales en las paredes que exigen la utilización de sistemas de contención temprana, aún para galerías piloto de sólo cuatro a seis metros cuadrados de sección. En la Fig. 5 se muestran imágenes comparativas de una galería excavada en el Pampeano Medio y otra en el Pampeano Inferior.



Fig. 5. Galerías en el Pampeano Medio e Inferior, Línea H, 2003.

El Pampeano es muy favorable para tunelería porque tiene una importante resistencia a la compresión simple en corto y mediano plazo, y a la vez exhibe un comportamiento altamente friccional. En la Fig. 6 se puede observar el encuentro entre un pozo de ataque elíptico de unos 30 m<sup>2</sup> de sección y 10 m de profundidad con un túnel de unos 55 m<sup>2</sup> de sección. El espesor de hormigón proyectado en túnel y pozo es del orden de 15 cm, sin que se hubieran observado fisuras u otra evidencia de incompatibilidad de deformaciones entre túnel y pozo.



Fig. 6. Pozo de ataque elíptico, Línea B, 2005.

#### 4. COMPARACIÓN ENTRE PROCEDIMIENTOS CONSTRUCTIVOS

El hecho de que en el 2006 se estén ejecutando simultáneamente túneles con los métodos alemán, belga y de frente completo demuestra que no existe un procedimiento constructivo mejor que otro. Sin embargo, algunas conclusiones están razonablemente bien establecidas.

Respecto del funcionamiento estructural:

- Conviene en lo posible separar las estructuras en primera y segunda etapa.
- Si la segunda etapa es de hormigón proyectado, conviene que ambos revestimientos estén vinculados estructuralmente, porque se obtiene un mejor funcionamiento estructural (Núñez 1996, Núñez 2000). La Fig. 1 muestra las cerchas de acero que sobresalen del hormigón proyectado y que sirven de vinculación entre ambas etapas.
- Si la segunda etapa es de hormigón moldeado, conviene que ambos revestimientos trabajen de manera independiente. El hormigón moldeado, vinculado al revestimiento de primera etapa, tiene impedida su contracción, lo que favorece la aparición de fisuras. La Fig. 3 muestra las cerchas completamente embebidas en el hormigón de primera etapa.

Respecto del uso de hormigón proyectado:

- Con la tecnología disponible en Buenos Aires, el hormigón proyectado no es estanco, por lo que, si se requiere estanqueidad, conviene que el revestimiento secundario sea de hormigón moldeado. La Fig. 7 muestra un contacto entre hormigón moldeado y proyectado.
- La interfase entre hormigón proyectado y Pampeano es tan resistente como el suelo intacto, mientras no exista filtración de agua durante las operaciones de hormigonado.
- Todavía no hay experiencia en el uso de hormigón proyectado con fibras ni en el empleo de robots. Con avances de uno a dos metros y colocación de hormigón proyectado hasta el frente, el uso de hormigón con fibras permitiría la eliminación de las cerchas de acero.



Fig. 7. Contacto entre hormigón proyectado (superior) y moldeado (inferior). Línea B, 1999.



Respecto de los métodos constructivos:

- El método alemán es el más lento y costoso de los tres, porque es el que requiere más mano de obra. No necesariamente es el más seguro ni el que produce menos impacto sobre superficie e instalaciones enterradas.
- El método belga ejecutado hasta el presente, en el que la bóveda de segunda etapa se construye antes que los hastiales, tiene un severo problema de estanqueidad en la junta horizontal bóveda – hastiales. Este problema podría ser parcialmente resuelto si la bóveda de segunda etapa se ejecutara después que los hastiales. En la Fig. 8 puede observarse el hormigonado de un hastial, con la bóveda terminada y el banco de suelo adyacente, correspondiente al hastial contiguo que todavía no fue construido. El contacto horizontal entre hastial y bóveda es malo porque la pata de la bóveda se hormigona contra el suelo y porque el hormigón de abajo (hastial) se coloca después del de arriba (bóveda).
- El método de frente completo es el más eficiente. Sin embargo, requiere una gran cantidad de hormigón moldeado colocado en una única etapa, con los problemas tecnológicos que ello implica. En la Fig. 9 se aprecia el molde de la línea B que comenzó a usarse en el 2005.



Fig. 8. Hormigonado de un hastial en el método Belga. Línea H, 2002.



Fig. 9. Molde para método de frente completo. Línea B, 2005.



## 5. INFLUENCIA DE LOS TÚNELES SOBRE ESTRUCTURAS SUPERFICIALES EL CASO DE LA CURVA PATAGONES – COLONIA

### 5.1. PLANTEO DEL PROBLEMA

La construcción de un túnel tiene influencia sobre estructuras e instalaciones existentes y produce una limitación al uso del suelo para obras futuras. Esta influencia depende del funcionamiento estructural del túnel, que a su vez queda determinado por su procedimiento constructivo. En cada caso particular, puede priorizarse uno o más de los siguientes objetivos globales: i) extremar la seguridad de la obra durante su construcción; ii) minimizar los asentamientos superficiales; iii) minimizar las molestias ocasionadas a los vecinos; y iv) minimizar las restricciones al uso futuro del suelo.

El túnel de la línea H (B: 9.0 m, H: 7.4 m) atravesó el subsuelo de la manzana noroeste limitada por las calles Patagones y Colonia con una tapada de unos 7.5 metros. Las construcciones existentes son viviendas, depósitos y galpones de una o dos plantas, con edades variables entre 15 y 70 años. No se pudo descartar la existencia de viejas excavaciones, pozos ciegos o aljibes que pudieran interferir con la traza del túnel o formar con éste situaciones de riesgo potencial.

El cliente estableció como premisa la minimización del impacto sobre las construcciones superficiales y solicitó el estudio comparativo de los siguientes métodos constructivos: i) alemán; ii) belga; iii) frente completo; y iv) galerías laterales (*side drifts*).

### 5.2. COMPARACIÓN ENTRE PROCEDIMIENTOS CONSTRUCTIVOS

La resistencia de la formación en el sitio es tal que el comportamiento de los suelos es cuasi elástico, por lo que los asentamientos dependen de la forma y tamaño del túnel y son prácticamente independientes del procedimiento constructivo.

Debido a la existencia de fisuración sistemática, el máximo avance sin sostenimiento que se acepta como seguro para suelos del Pampeano es de 2.5 metros, si no existen filtraciones de agua. Hasta este máximo, la longitud de avance sin sostenimiento tiene muy poca influencia en el asentamiento en superficie. En la Tabla 2 se presentan los asentamientos calculados con parámetros no drenados, en la Tabla 3 los calculados con parámetros drenados.

Tabla 2. Asentamientos calculados con parámetros no drenados.

		Alemán	Belga	Frente completo	Avance lateral
Superficie, eje del túnel	mm	4.9	4.3	4.6	6.1
Superficie, vertical del hastial	mm	3.6	3.2	3.7	5.6
Distorsión angular en superficie	-	1/3846	1/4545	1/5555	1/10000
Clave	mm	7.3	7.2	6.6	8.2

Tabla 3. Asentamientos calculados con parámetros drenados.

		Alemán	Belga	Frente completo	Avance lateral
Superficie, eje del túnel	mm	7.4	5.3	6.7	-
Superficie, vertical del hastial	mm	5.9	4.0	5.4	-
Distorsión angular en superficie	-	1/3333	1/3846	1/3846	-
Clave	mm	9.5	8.5	7.9	-

La seguridad durante la excavación es inversamente proporcional al área del frente. Los métodos belga, de avances laterales y alemán tienen un área de excavación del orden de la mitad del área del frente mientras que el método de frente completo tiene un área de excavación igual al área del túnel, por lo que la seguridad del frente es mínima en este último caso. En la Fig. 10 se muestra el modo de falla asociado al método constructivo de frente completo.

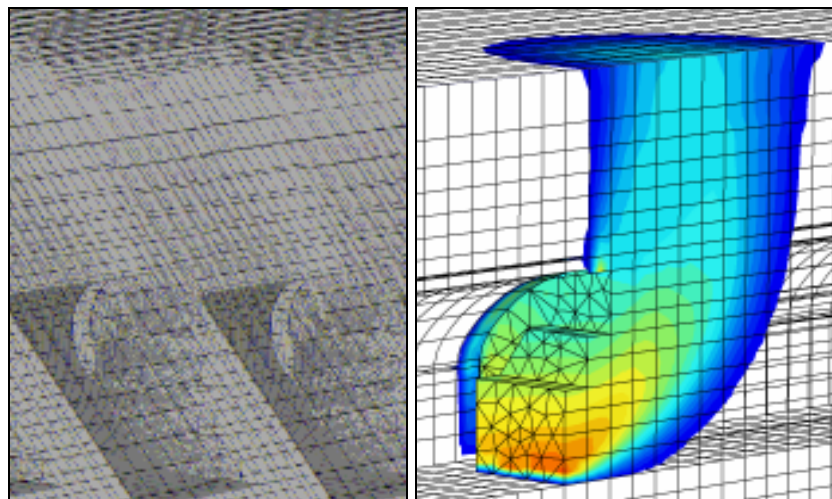


Fig. 10. Forma de falla asociada al método de frente completo.

En este escenario geotécnico, el método alemán es menos seguro que el método belga, porque la excavación de hastiales descomprime los suelos inmediatamente por delante del frente principal. Si los suelos atravesados por las galerías de hastiales no son muy competentes, el método alemán puede no ser seguro, ya que expone amplias superficies de excavación sin sostenimiento. En la Tabla 4 se presentan los coeficientes de seguridad de los diferentes métodos constructivos.

Tabla 4. Coeficientes de seguridad de algunas de las etapas de construcción, parámetros medios.

	Alemán	Belga	Frente completo	Avance lateral
Etapas	Hastiales construidos, avance en bóveda	Avance en bóveda, banco sin excavar	Avance en bóveda, anillo cerrado	Galería inicial construida, avance en bóveda
Modo de falla	Clave de hastiales	Frente	Frente	Frente
F	2.63	>7	4.70	>7

### 5.3. DISEÑO ADOPTADO

Luego del análisis comparativo, el cliente decidió el empleo del método belga con avances de un metro, zapatas temporarias anchas y con un espesor del sostenimiento de primera etapa mayor que el utilizado en el resto del túnel. La obra se ejecutó en el plazo previsto, con asentamientos superficiales que en general fueron del orden de tres a cuatro milímetros, un 20% - 50% menores que los calculados.

Excepto por la selección del procedimiento constructivo y la limitación del avance a 1.0 metro, el resto de las medidas reseñadas son poco efectivas. El aumento del espesor del sostenimiento de primera etapa no cambia los asentamientos. En efecto, si el túnel tiene un ancho  $B$  y una tapada  $D$  y se admite en primer análisis que su bóveda es un semicírculo, el esfuerzo normal en el hormigón es no mayor a

$$N = \gamma \cdot D \cdot \frac{B}{2} \quad (2)$$

El asentamiento producido por la compresión del sostenimiento de espesor  $t$  es

$$\delta = \frac{NB}{2Et} \quad (3)$$

y para casos normales está en el rango 0.3 mm – 0.5 mm. Si se duplica el espesor (y por lo tanto el costo del sostenimiento), la reducción de asentamiento es de 0.15 mm – 0.25 mm, lo que resulta despreciable frente a las otras variables del problema.

El aumento del ancho de las zapatas temporarias tampoco disminuye los asentamientos, como se deduce de la teoría de la elasticidad. En efecto, el asentamiento de una zapata continua de ancho  $B_f$ , sometida a una presión de contacto  $q$  y apoyada sobre un material elástico de parámetros  $(E, \nu)$  obedece a la expresión

$$\delta = q \cdot B_f \cdot \frac{(1-\nu^2)}{E} I_\rho = P \frac{(1-\nu^2)}{E} I_\rho \quad (4)$$

lo que significa que, dentro del rango elástico, el asentamiento depende de la carga lineal  $P = q B_f$  y es independiente de  $q$  o de  $B_f$ . Si la fundación se aproxima a su condición de ruptura se produce un asentamiento inelástico y se transfiere carga desde el sostenimiento a los suelos adyacentes.

El análisis convencional de capacidad de carga de zapatas continuas asume que la carga es independiente del asentamiento. En el caso de las zapatas temporarias de un túnel, la carga total sobre la fundación es el resultado de la interacción suelo – revestimiento, y por lo tanto depende del asentamiento. Esto invalida los cálculos convencionales de capacidad de carga para zapatas de túneles.

## 6. INTERACCIÓN CON INSTALACIONES ENTERRADAS. EL CRUCE SOBRE EL CLOACAL CASEROS

### 6.1. PLANTEO DEL PROBLEMA

Los túneles cruzan con frecuencia por encima o por debajo de instalaciones de infraestructura de la Ciudad. Estas instalaciones son en general antiguas, por lo que su documentación técnica es poca o inexistente y se desconoce el estado de conservación.

Como ejemplo de este problema se presenta el cruce del túnel de la línea H sobre un conducto cloacal en la intersección de las Av. Caseros y Jujuy. El conducto, de hormigón simple, 2.7 m de diámetro y 0.27 m de espesor, fue construido hace más de cuarenta años y no puede salir de servicio. La Concesionaria exigió que el paso del túnel por encima del conducto no produjera en éste deformaciones o solicitaciones que pudieran afectar su funcionamiento. Desde el punto de vista constructivo, los riesgos principales identificados eran: i) la ocurrencia de un pico de presión en el conducto mientras los suelos que lo rodean estuvieran descomprimidos por las acciones de tunelería; y ii) que el agua freática estuviera hidráulicamente conectada al agua transportada y que se produjeran inestabilidades durante la excavación manual.

La solución adoptada consistió en la colocación de una estructura rígida con forma de yugo, con el fin de: i) minimizar la descompresión de los suelos que rodean al conducto; ii) reducir los movimientos del conducto; iii) proteger el conducto de las cargas ferroviarias; y iv) proveer al túnel de una fundación independiente y trasladar sus cargas a suelos ubicados por debajo del conducto. En la Fig. 11 se presenta un esquema de la solución.

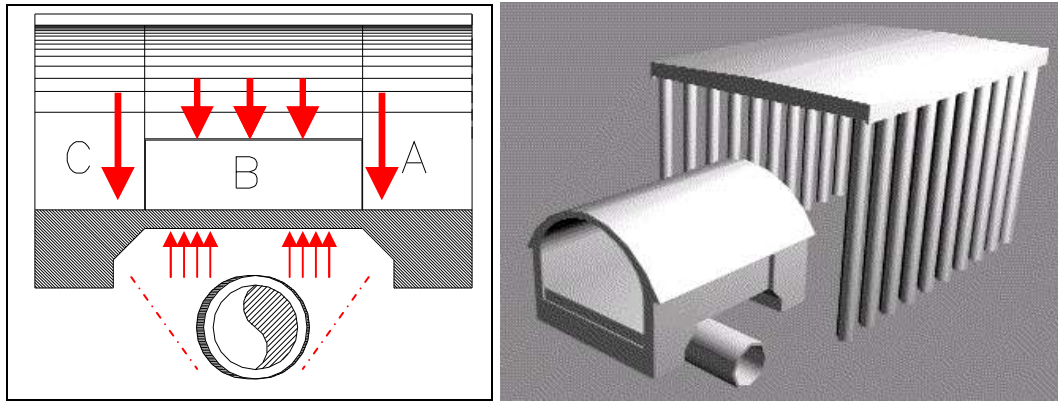


Fig. 11. Esquema de la estructura de protección sobre el conducto.

## 6.2. PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO

Se estableció el procedimiento constructivo que se indica en la Fig. 12.

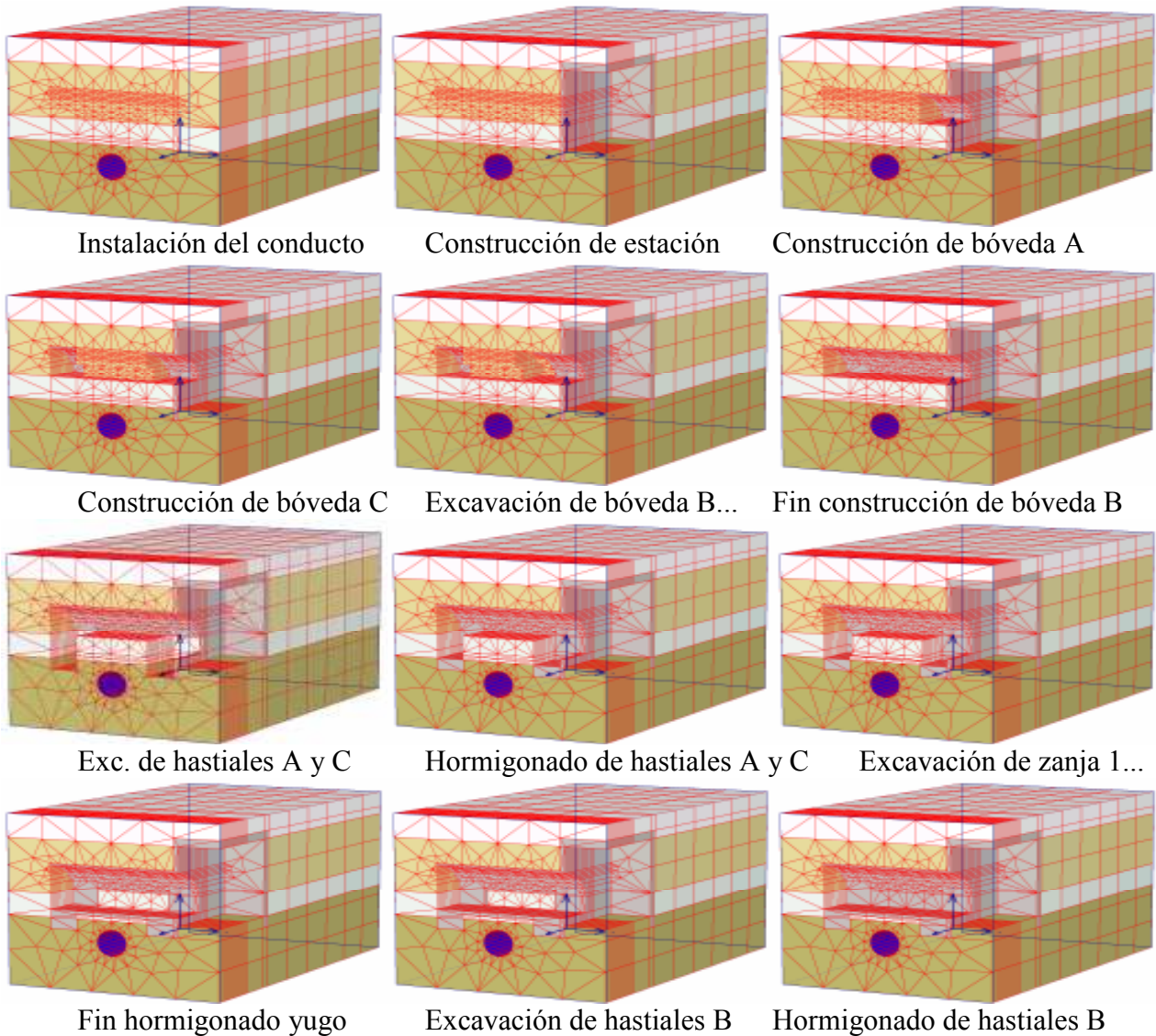


Fig. 12. Modelización del procedimiento constructivo



La modelización detallada de cada una de las etapas del procedimiento constructivo (20 en total, se muestran sólo las principales) resultó necesaria para establecer criterios de control en obra: i) asentamientos y deformaciones umbrales; ii) puntos críticos de inspección; iii) máxima presión en el interior del conducto tolerable en las distintas etapas de obra.

### 6.3. RESPUESTA DEL CONDUCTO

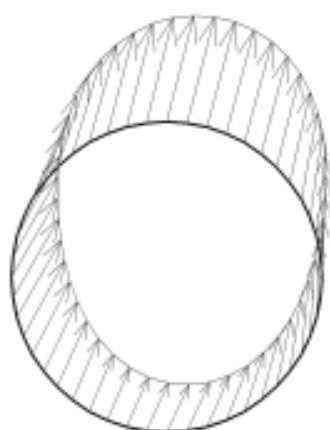
El modelo indica que el conducto sufre una importante descompresión temporaria que, debido a la secuencia constructiva utilizada, sólo afecta a una pequeña longitud en cada etapa. El resultado final calculado es una ovalización milimétrica de la sección transversal y la inversión del momento flexor transversal en la clave del conducto, de manera que la fibra traccionada final es la exterior.

Si se considera que el conducto está intacto con su resistencia a la tracción inalterada, el procedimiento no induce fisuración. Si se asume que el conducto está fisurado, la compresión impuesta por el suelo mantiene las fisuras comprimidas en todas las etapas de construcción.

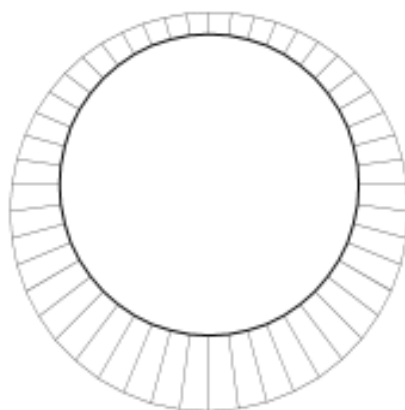
En la Tabla 5 se presentan los desplazamientos y solicitaciones inducidas en el conducto desde su construcción hasta que se completa el paso del túnel por encima de la estructura del yugo.

Tabla 5. Desplazamientos y solicitaciones en el conducto durante las etapas de construcción.

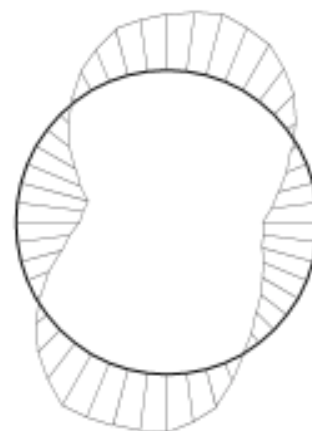
		Const. Conducto		Const. Estación		Bóveda A		Bóveda C	
		Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo
Desplazamiento vertical	mm	0.486		-0.183		-0.173		0.151	
Normal circunferencial	KN/m	-329	-403	-273	-380	-256	-376	-177	-330
Normal longitudinal	KN/m	-66	-81	-70	-232	-63	-260	-74	-324
Momento circunferencial	KNm/m	8.3	0.1	13.6	0.1	14.4	0.4	10.3	0.1
Momento longitudinal	KNm/m	1.7	0.0	3.1	0.0	3.4	0.0	2.4	0.0
		Bóveda B		Horm. hast. A-C		Exc. Viga central		Horm. tabiques	
		Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo
Desplazamiento vertical	mm	1.022	0.000	0.948		0.943		1.398	
Normal circunferencial	KN/m	-96	-276	-70	-256	-92	-255	-83	-236
Normal longitudinal	KN/m	30	-479	17	-512	-10	-514	18	-596
Momento circunferencial	KNm/m	6.5	0.1	3.6	0.0	3.6	0.0	7.7	0.0
Momento longitudinal	KNm/m	3.3	0.0	2.6	0.1	2.0	0.0	2.7	0.1



Desplazamientos



Esfuerzos normales



Momentos flexores

Fig. 13. Solicitaciones y desplazamientos al fin de construcción. Valores en tabla.

## **6.4. CRÍTICA AL PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO**

Los análisis de sensibilidad mostraron que las incertidumbres respecto de los parámetros de entrada impiden cualquier conclusión asertiva, y que el método presentado es poco más que una herramienta de análisis cualitativo.

Sin embargo, los modelos numéricos son una herramienta válida: se requiere una mejor información acerca de las estructuras existentes y ecuaciones constitutivas mejor calibradas para los suelos. Si se dispone de estas herramientas, los modelos numéricos son relativamente confiables y permiten la toma de decisiones sobre bases cuantitativas, reproducibles y verificables.

## **7. REFLEXIONES FINALES**

Se han compartido algunas experiencias recientes en el proyecto de procedimientos constructivos para túneles en Buenos Aires. La información presentada muestra que se ha recorrido un buen camino en la mejora de estos procedimientos, y que aún queda mucho por hacer.

Respecto de los procedimientos constructivos, los temas de estudio futuro más interesantes son: i) la introducción del hormigón proyectado con fibras; ii) la colocación de hormigón proyectado con robots; iii) la incorporación de hormigón proyectado por vía seca; iv) el abandono de los túneles estancos; v) la guía laser de las excavaciones; vi) la optimización en el uso de las cerchas de acero; vii) el desarrollo de una técnica de abatimiento de napas que permita el abandono de las galerías de drenaje; y viii) mejoras en la tecnología del hormigón y mayor control de la fisuración, tanto en hormigón moldeado como proyectado.

Respecto del Pampeano, los desafíos a futuro son: i) la medición confiable de  $K_0$ ; ii) el estudio de las propiedades de la interfase hormigón proyectado – suelo; iii) la calibración de una ecuación constitutiva que reproduzca el comportamiento del material con drenaje parcial y que permita el abandono de los parámetros ( $c_u$ ,  $\phi_u$ ); y iv) la medición sistemática y confiable del desarrollo de tensiones suelo - revestimiento en el largo plazo, que permita economías en el diseño estructural del revestimiento definitivo.

Como es conocido, los túneles tienen influencia sobre las construcciones superficiales e instalaciones enterradas. Gracias a la rigidez y resistencia del Pampeano, esta influencia se limita a la aparición de desplazamientos milimétricos que no han implicado daños significativos a construcciones existentes, al menos en las obras mencionadas en este documento.

Una última reflexión es firme: se necesita continuidad en las obras para que se formen y mantengan los equipos de profesionales que permiten la mejora de los procedimientos de trabajo. La Ciudad se beneficia con ésto: un metro de túnel le cuesta en el 2006 poco más que la mitad de lo que costaba antes de 1998, tiene mejor calidad y se ejecuta en la mitad del tiempo.

## **8. AGRADECIMIENTOS**

Mi maestro Eduardo Núñez me dio la primera oportunidad de trabajar en tunelería y me enseñó técnicas y trucos del oficio. Mis compañeros en la oficina y los profesionales de las empresas Techint, Dycasa, Roggio y SBASE me permitieron aprender con ellos a través de las permanentes discusiones que preceden, acompañan y siguen a cada decisión de obra. A todos ellos quiero expresarles mi reconocimiento.

## 9. TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Bolognesi, A. (1975). "Compresibilidad de los suelos de la Formación Pampeano". V PCSMFE, Buenos Aires, V: 255-302.
- Bolognesi, A. y O. Vardé (1991). "Subterráneos en Buenos Aires". IX PCSMFE, Viña del Mar, Chile, III:1329-1350.
- Fidalgo, F., F. De Francesco y R. Pascual (1975). "Geología superficial de la llanura Bonaerense". En: VI Congreso Geológico Argentino.
- Núñez, E. (1986). "Panel report: geotechnical conditions in Buenos Aires City". En: Proceedings, Fifth International Conference, International Association of Engineering Geology.
- Núñez, E. y C. Micucci (1986b). "Cemented preconsolidated soils as very weak rocks". En: Proceedings, Fifth International Conference, International Association of Engineering Geology.
- Núñez, E., 1996, "Túneles de sección circular en la formación pampeano". SAMS, Boletín de la Sociedad Argentina de Mecánica de Suelos, No. 29.
- Núñez, E., 2000, "Excavaciones y túneles en el Pampeano". Conferencia F. L. Torres, GEOBA 2000.
- SBASE, 2006. Página Institucional. <http://www.sbase.com.ar/>.
- Sfriso, A., 1996, "Túneles de sección circular en la formación pampeano - comentario". SAMS, Boletín de la Sociedad Argentina de Mecánica de Suelos, No. 29.
- Sfriso, A., 1998, "Tunnels in Buenos Aires soils: Application of numerical methods to the structural design of linings". V CPMSIG, Foz de Iguazú.
- Sfriso, A., 2006. Ensayo de carga en placa. Informe técnico para BRH SA y Dirección de Obra SBASE, Extensión de Línea B Tramo C.
- Vermeer, P. (1998). Plaxis Users Manual. Balkema, Rotterdam. Ne.