

# Una experiencia de patología de túneles: el caso de la III Cloaca Máxima

Sfriso, A.

SRK Consulting y Universidad de Buenos Aires

[asfriso@fi.uba.ar](mailto:asfriso@fi.uba.ar)

[www.fi.uba.ar/materias/64.08](http://www.fi.uba.ar/materias/64.08)

[asfriso@srk.com.ar](mailto:asfriso@srk.com.ar)

[www.srk.com.ar](http://www.srk.com.ar)

Palabras clave: patología – túneles – erosión - Postpampeano

Resumen: Se presenta una descripción del colapso de la III Cloaca Máxima (1997) junto con el análisis de sus causas probables. Se extraen dos lecciones de la experiencia: no se debe construir un túnel de hormigón simple en suelos erosionables ni permitir que una obra subterránea opere sin inspección ni mantenimiento.

## 1 INTRODUCCIÓN

El comportamiento de las estructuras subterráneas durante su construcción y luego de su puesta en servicio depende de las condiciones geológico-geotécnicas del medio, del diseño, del procedimiento empleado en la construcción, del tipo y calidad de los materiales, de la acción del agua freática, del destino de la obra – la naturaleza de los materiales almacenados o transportados – y de la edad de la obra.

El diagnóstico del estado de una obra subterránea terminada tiene características particulares que se derivan de todos esos factores que influyen en su comportamiento. Así, la determinación de la integridad estructural se convierte en una tarea que reclama la colaboración de varias disciplinas de la ingeniería: geotecnia, ingeniería estructural y tecnología de los hormigones, como mínimo.

En este artículo se presenta una experiencia que muestra el comportamiento de túneles en suelos: el colapso de la III Cloaca Máxima, ocurrido en 1997 en Pompeya. Las enseñanzas extraídas de esta experiencia pueden aplicarse al diseño de otros túneles urbanos, implantados en suelos blandos y bajo el agua freática.

## 2 OBRAS SUBTERRÁNEAS

### 2.1 Definiciones

En lo que sigue de este artículo se entiende que una obra subterránea es una construcción que genera un espacio útil subterráneo mediante la excavación de suelos o rocas con técnicas mineras. Esta definición no incluye las excavaciones a cielo abierto que luego son cubiertas parcialmente con tierra.

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 denomina *sostenimiento primario*, se ejecuta cerca del frente de excavación y tiene como función principal el sostenimiento del terreno en el corto plazo. La segunda etapa, de terminación, se denomina *revestimiento definitivo*, se ejecuta dentro de un túnel limpio y seco, y se diseña en función del destino de la obra.

### 2.2 Funcionamiento conceptual de un túnel

Un túnel es un orificio practicado en un sólido tridimensional: el terreno. Si este sólido – el terreno – es muy competente, las concentraciones de tensiones producidas por el orificio son toleradas por el sólido y no se requieren refuerzos. Si el sólido – el terreno – es menos competente, se requiere un *refuerzo de orificio* que es el sostenimiento.

O sea, el terreno se sostiene a sí mismo con la colaboración de una estructura auxiliar – el sostenimiento – que sólo debe ser diseñada para aportar el refuerzo que la estructura principal – el terreno – necesita.

La concepción de un túnel como una estructura que debe soportar las *cargas* del terreno es infértil, y sólo conduce a diseños costosos, difíciles de construir y, en muchos casos, propensos a mal desempeño. En cambio, la concepción de un túnel como la interacción entre dos estructuras – terreno y sostenimiento – permite un diseño más simple y capaz de balancear conceptos de seguridad estructural, costos y logística. La riqueza relativa de una concepción sobre otra se traslada a los métodos de diagnóstico y análisis de patologías de túneles.

### 2.3 Procedimientos constructivos convencionales para obras subterráneas

Los procedimientos constructivos convencionales son aquellos que emplean máquinas de construcción convencionales para la excavación del terreno y para la construcción de la estructura de sostenimiento. Para macizos rocosos pueden emplearse la perforación y tronadura o las rozadoras; el sostenimiento puede estar compuesto por pernos, mallas, marcos de acero y hormigón proyectado. Para suelos, es común el empleo de retroexcavadoras y rozadoras; y el sostenimiento mediante marcos de acero, mallas y hormigón proyectado.

Una descripción de los procedimientos constructivos empleados en los túneles urbanos de la Ciudad de Buenos Aires puede encontrarse en (Sfriso, 2006 y 2008). Una descripción más detallada del diseño y procedimiento constructivo de la Estación Corrientes, Línea H, puede encontrarse en (Sfriso, 2007). Los tres documentos se incluyen como anexos de este artículo, por lo que el tema no será analizado aquí con más detalle.

### 2.4 Tuneleras

Las tuneleras son máquinas que permiten la construcción industrializada de un túnel, integrando las etapas de excavación, sostenimiento primario y revestimiento definitivo de los túneles.

Como máquina, una tunelera es un disco circular – provisto de uñas u otras herramientas de corte – que rota y avanza. Durante su avance, la máquina excava el terreno, sostiene la pared de la excavación y coloca dovelas prefabricadas que constituyen el sostenimiento del terreno y el revestimiento final del túnel. Así, el terreno nunca queda expuesto y la estructura del túnel se coloca en una única etapa.

Existen dos tipos de tuneleras para suelos:

1. Escudo simple
2. Escudo doble.

Las tuneleras de escudo simple tienen un cuerpo principal formado por un tubo de acero circular que contiene todos los elementos necesarios para la construcción del túnel: las herramientas de corte en el frente, los equipos de transporte de terreno excavado hacia la parte posterior de la máquina y los mecanismos de colocación de dovelas en la cola. La tunelera avanza empujando el último anillo de dovelas construido, por lo que la reacción necesaria para la excavación se obtiene de la compresión longitudinal de la estructura terminada. Por lo tanto, el avance es intermitente: la máquina avanza empujando un anillo de dovelas, luego se detiene, monta un anillo de dovelas y vuelve a avanzar.

Las tuneleras de escudo doble son, en realidad, dos máquinas: un escudo frontal excava el terreno, mientras que el escudo posterior coloca las dovelas.

Para que el escudo frontal avance, el escudo posterior presiona las paredes de la excavación con patines de fricción. Así, es posible que el escudo frontal avance de manera ininterrumpida, mientras que el escudo posterior avanza de manera intermitente, como en las tuneleras de escudo simple. Las tuneleras de escudo doble cerrado pueden, además, sostener una presión hidrostática en el frente, lo que les permite estabilizar terrenos que de otra manera no podrían ser tuneleados.

La referencia al empleo de tuneleras es pertinente porque, si el túnel cuyo colapso se analiza más adelante fuera construido hoy, sería construido con una tunelera de escudo doble.

En la Fig. 2.1 se muestra el esquema de una máquina tunelera compacta fabricada por SELI, y que está iniciando operaciones en el proyecto de exploración minera Túnel Sur Los Bronces, en Chile.

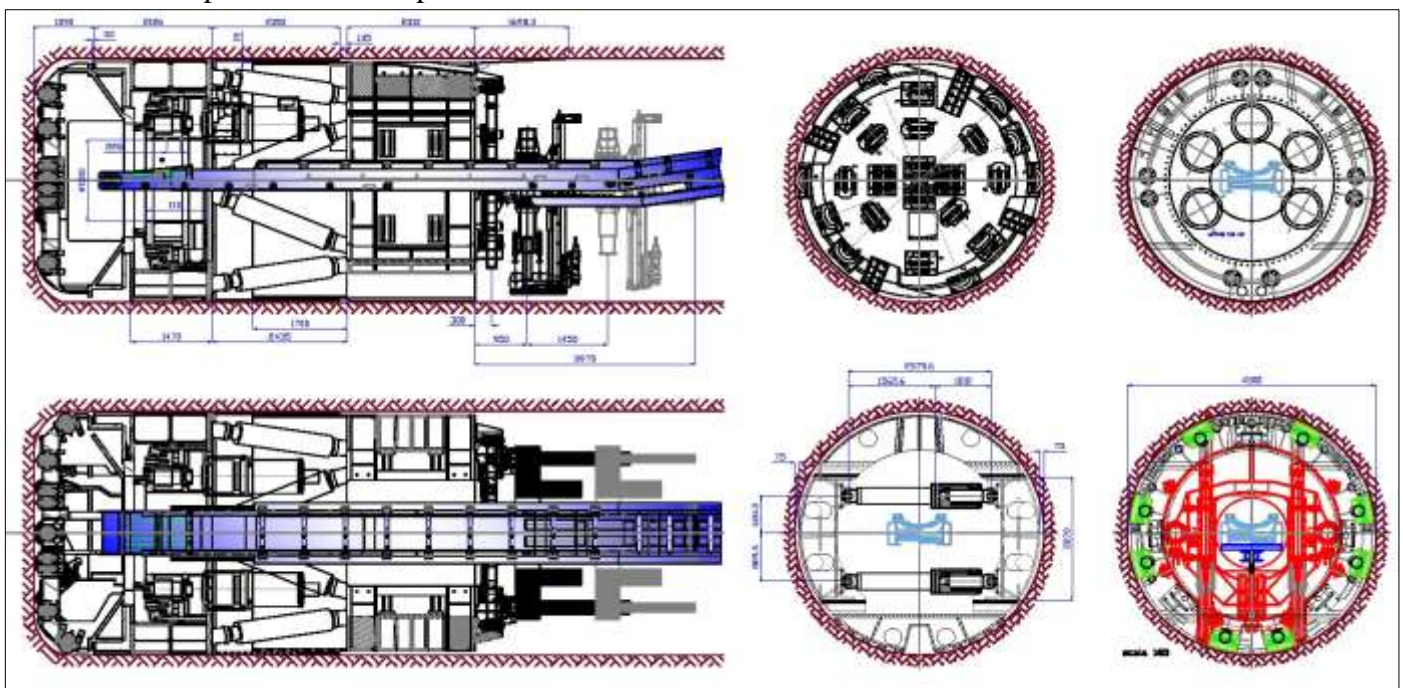


Fig. 2.1. Tunelera compacta SELI que inicia operaciones en el proyecto de exploración Túnel Sur Los Bronces, Chile.

### 3 LA PATOLOGÍA DE TÚNELES

#### 3.1 Sostenimiento primario

Las fallas ocurridas durante la excavación y colocación del sostenimiento primario no se clasifican – en general – como problemas de patología de túneles. Sin embargo, la calidad de la excavación y el tipo de respuesta del terreno durante la excavación pueden tener fuerte influencia en el comportamiento del túnel a lo largo del tiempo.

Como ejemplo, en la Fig. 3.1 puede apreciarse la sección transversal teórica de un túnel – excavado en un macizo rocoso – y una superposición de las secciones efectivamente obtenidas. Se observa que las sobre-excavaciones de la clave del túnel alcanzan casi un metro de espesor, mientras que las sobre-excavaciones de los hastiales son prácticamente nulas. En este túnel no estaba prevista la colocación de hormigón moldeado en clave; sólo la instalación de pernos y hormigón proyectado. Por lo tanto, esta sobre-excavación no se tradujo en un problema de patología de las estructuras. En casos similares, sin embargo, sobre-excavaciones de esta magnitud deben rellenarse con hormigón moldeado, con consecuencias obvias: el hormigonado de un metro de espesor o más produce deformación en los encofrados, generación de calor, fisuración del hormigón masivo – muy pobremente armado – y serios defectos de llenado en los puntos altos de la clave.

Todos estos defectos de construcción, originados en la pobre calidad de la excavación, redundan en problemas de patología de las estructuras que se hacen evidentes – a veces – años después que la obra entra en servicio.

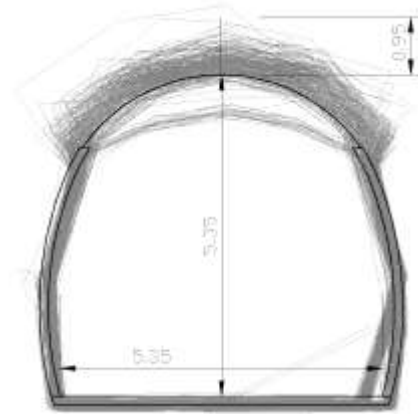


Fig. 3.1. Ejemplo de sobre-excavación en un túnel en rocas.

#### 3.2 Revestimiento definitivo

Las patologías más frecuentes asociadas a la instalación del revestimiento definitivo son la fisuración del revestimiento y la falla de las juntas. Ambas patologías están generalmente asociadas al ingreso de agua al túnel. En el artículo adjunto (Sfriso, 2006) se presentan algunos ejemplos de patología de estructuras, asociadas a procedimientos constructivos empleados en tunelería en Buenos Aires.

Como ejemplo complementario, en la Fig. 3.2 se aprecia el estado de fisuración del revestimiento secundario – bóveda, hastiales y solera para un túnel excavado en un macizo rocoso. Hay fisuras transversales asociadas a problemas de tecnología del hormigón, y fisuras longitudinales en solera, asociadas a subpresión. La bóveda, en arco de medio punto, resistió la presión de agua y casi no tiene fisuras. En la Fig. 3.3 se observa el ingreso de agua a través de orificios practicados en la solera del mismo túnel.



Fig. 3.2. Mapeo de fisuras en un tramo de un túnel excavado en un macizo rocoso. Fisuras transversales: tecnología del hormigón. Fisuras longitudinales en solera: subpresión. La bóveda prácticamente no tiene fisuras.



Fig. 3.3. Ingreso de agua a través de orificios practicados en la solera del túnel mapeado en la Fig. 3.2.

### 4 EL CASO DE LA III CLOACA MÁXIMA

#### 4.1 Introducción

En esta sección se describe el colapso de la III Cloaca Máxima, ocurrido a fines de 1997 en la Av. del Barco Centenera y Roca, en Pompeya. Se describen los hechos y sus causas probables, y se pondera el efecto relativo de los diferentes factores condicionantes que confluyeron en este colapso.

Una parte importante del material está tomado de la pericia técnica ejecutada por el autor y otros profesionales (Leoni, A., Soubié, C., Vernet, G., Llavallaz, P., Sfriso, A., y Becker, R.) para la causa penal derivada del incidente.

## 4.2 Descripción del caso

A fin de 1997, el túnel de la III Cloaca Máxima colapsó, produciendo el hundimiento del pavimento en coincidencia con la traza del conducto (Fig. 4.1 y 4.2).

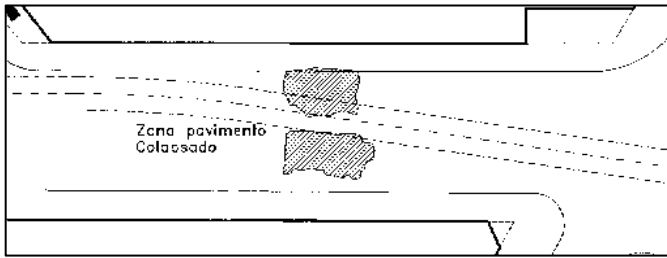


Fig. 4.1. Hundimiento del pavimento de la Av. Del Barco Centenera por falla de la III Cloaca Máxima. Croquis.



Fig. 4.2. Hundimiento del pavimento de la Av. Del Barco Centenera por falla de la III Cloaca Máxima. Vista.

Estos hundimientos se produjeron como consecuencia de la erosión de suelo, arrastrado hacia el interior del túnel por las aguas freáticas que se infiltraban en el conducto a través de sus fisuras (Fig. 4.3).

El colapso produjo la salida de servicio de la III Cloaca, la interrupción total del a Av. del Barco Centenera y el vertido de aguas servidas al Riachuelo. Como consecuencia del colapso, se ejecutaron tareas de reparación y reacondicionamiento de un importante tramo del conducto.

En el sitio del colapso, estas obras de reparación incluyeron la remoción total de los suelos, la demolición del conducto, su reconstrucción integral y la restitución del relleno con suelos compactados.

En el resto del tramo se ejecutaron trabajos extensivos de inyección y consolidación de suelos y otras obras de mantenimiento preventivo.

## 4.3 Diagnóstico

El mecanismo del colapso está relativamente bien comprendido y no es objeto de discusión. Lo que debe analizarse – por la controversia que genera y por las consecuencias económicas – es porqué el colapso se produjo más de cincuenta años después de que la obra entrara en servicio.

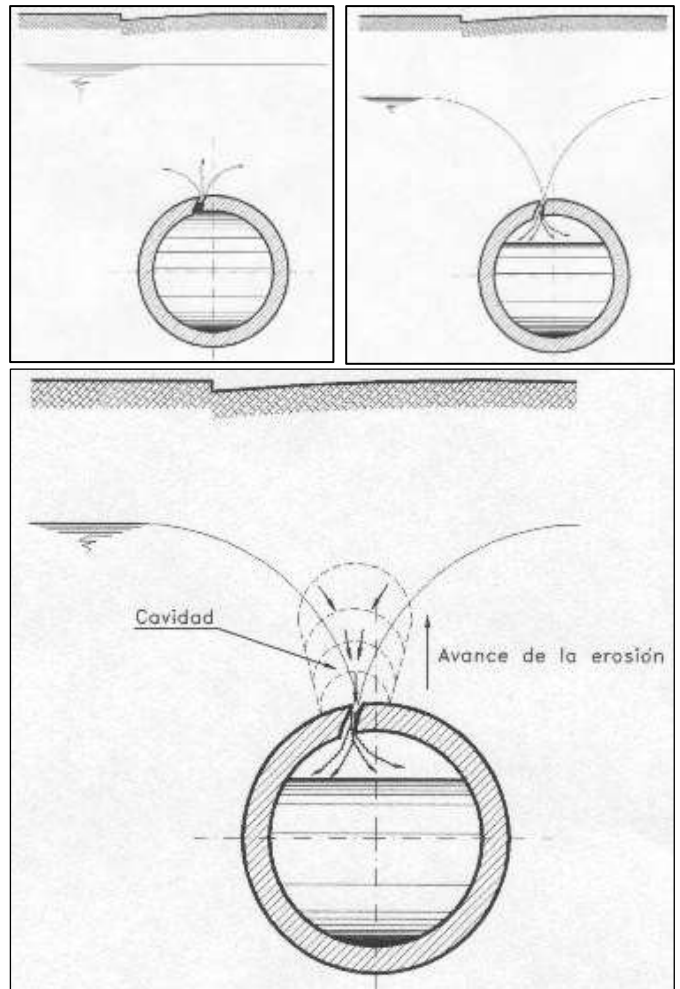


Fig. 4.3. Croquis que muestran el proceso de erosión de suelos a través de las fisuras de la III Cloaca Máxima.

Un hecho es significativo. El colapso ocurrió algunos meses después que se completó la construcción de una obra cercana, una sucursal del Supermercado Coto. La construcción incluyó el abatimiento del nivel freático, la hinca de pilotes y la ejecución de una excavación de dos metros de profundidad. Al respecto hay dos opiniones encontradas:

1. El túnel estaba estructuralmente sano; la construcción de la obra produjo todo el daño.
2. El túnel estaba estructuralmente comprometido; la construcción de la obra adyacente fue el factor condicionante que produjo la inestabilidad final.

Los demás factores condicionantes del colapso de la III Cloaca Máxima, cuyo peso relativo debe ser valorado, fueron:

1. El ambiente geológico-geotécnico era muy desfavorable, porque el túnel atravesaba suelos blandos del Postpampeano.
2. El túnel era de hormigón simple, construido entre 1939 y 1945 mediante avances cortos, con auxilio de aire comprimido.
3. El túnel operaba en régimen intermitente: a sección llena y a superficie libre.
4. La obra no tenía adecuado mantenimiento.

El peso relativo de estos factores condicionantes con respecto a la construcción del Supermercado en sí misma será analizado en las secciones siguientes.

### 4.3.1 Geología y geotecnia

En la zona de falla, el conducto está apoyado en los limos compactos de la Formación Pampeano pero rodeado por arenas limosas sueltas saturadas que pertenecen a valle de inundación del Matanza – Riachuelo y que se caracterizan como Formación Postpampeano (Fig. 4.4). La transición del Pampeano al Postpampeano ocurrió pocos metros aguas arriba del sitio del colapso.

Este es un factor condicionante porque: i) el conducto está rodeado por suelo erosionable, de muy baja rigidez y muy pobre competencia mecánica; ii) su entorno es heterogéneo, con bóveda en terrenos blandos y solera en suelos duros; iii) las malas condiciones geotécnicas provocaron un cambio de procedimiento constructivo que impactó en el desempeño de la obra y que constituye otro factor condicionante por sí mismo.

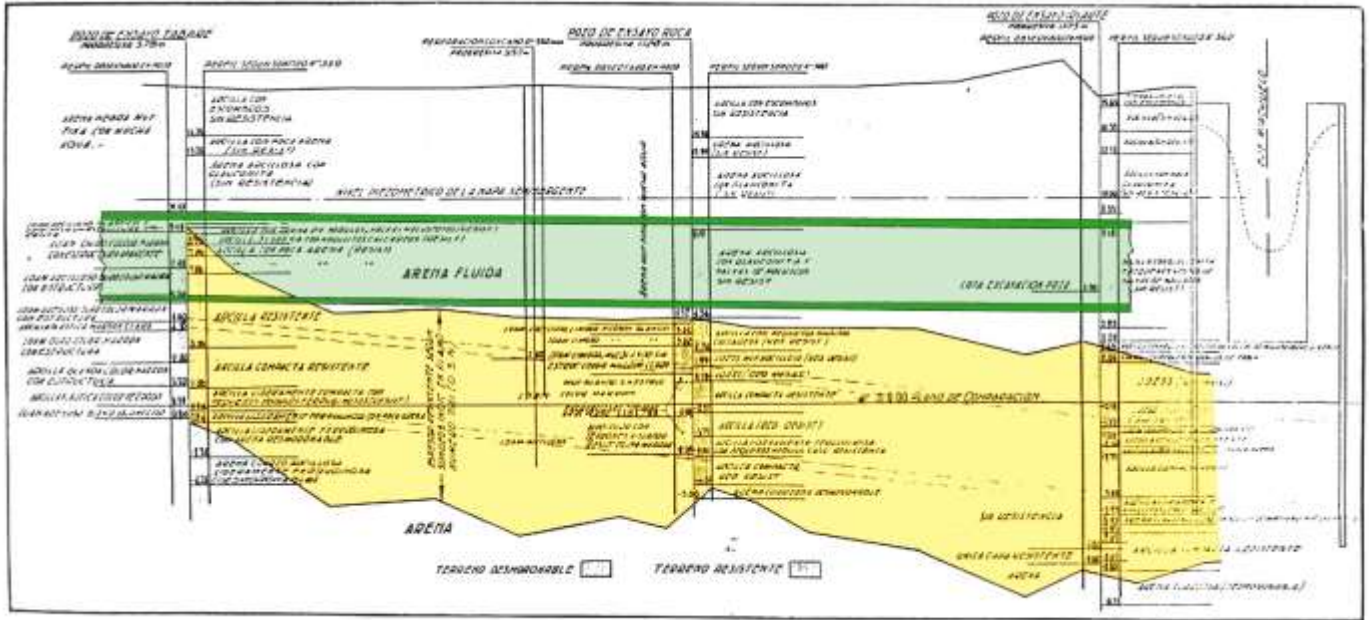


Fig. 4.4. — Perfil del terreno obtenido en los pozos de ensayos

Fig. 4.4. Croquis longitudinal de la III Cloaca Máxima que muestra el ambiente geológico-geotécnico. Se aprecia que el conducto estaba apoyado en suelos firmes del Pampeano pero rodeado por suelos blandos del Postpampeano.

### 4.3.2 Diseño y método constructivo

El conducto era de hormigón simple, construido en caverna, bajo aire comprimido.

Este es un factor condicionante porque: i) la estructura es muy rígida e incapaz de adaptarse a cambios en su estado tensional; ii) la excavación en caverna, asociada al empleo de hormigón simple moldeado, implica la existencia de muchas juntas transversales defectuosas, ejecutadas en un ambiente desfavorable; iii) el hormigón moldeado se colocaba en dos o tres etapas, lo que provocó numerosas juntas frías horizontales.

En general, los cambios en el estado tensional se producen por cambios en el nivel freático, asentamientos en el terreno producidos por obras, cargas y vibraciones.

El método constructivo – aire comprimido – comenzó a usarse en esa obra en el preciso lugar de la falla, luego de una paralización de tres años de las obras como consecuencia de la imposibilidad de avanzar a cielo abierto.

En la Fig. 4.5 se ve una vista del extradós del conducto antes de su demolición. Se aprecian las juntas transversales – constructivas – y las grietas longitudinales producidas por el colapso estructural.



Fig. 4.5. Vista del extradós del conducto. Se aprecian las fracturas longitudinales y las juntas transversales.

### 4.3.3 Régimen de operación

La operación del conducto era intermitente. Durante parte del día operaba a superficie libre, mientras que en otros momentos operaba a sección llena. Las paradas de bombeo producían, además, pulsos de presión muy significativos.

Este es un factor condicionante porque el cambio de régimen implica inversión en el sentido de flujo de agua a través de las fisuras. Este mecanismo es particularmente destructivo, puesto que acelera significativamente la erosión de los suelos, descalza la estructura del conducto precisamente en los sitios en los que está más fisurado, y por lo tanto aumenta el tamaño de las fisuras. Así, el fenómeno se alimenta a sí mismo.

#### 4.3.4 Inspección y mantenimiento

La falta de mantenimiento e inspección periódicas fue un factor condicionante principal. Tanto la existencia de fisuras como la erosión de suelos son fenómenos que pueden ser observados mediante una adecuada inspección de rutina.

#### 4.4 Análisis

El problema se estudió mediante modelos numéricos que simularon el proceso completo de la obra, desde su construcción hasta su colapso. En la Tabla 4.1 se muestra la situación del conducto antes de la construcción de la obra del supermercado. Se presentan dos estados: a fin de construcción y cuando operaba a sección llena con presión máxima. ER es la excentricidad relativa de la solicitación, calculada como  $M/N$  dividido por el espesor del revestimiento.

Tabla 4.1. Solicitaciones estructurales de la clave para algunos estados de carga, si se asume comportamiento elástico.

	N [kN]	M [kNm]	ER	$\sigma$ [kPa]
Fin de construcción	227	65	57%	1106
Presión interior máxima	92	65	141%	1376

Excentricidades relativas superiores a 17% – un sexto del espesor – implican la existencia de tensiones de tracción. Si la excentricidad relativa supera el 50%, la resultante cae fuera de la sección de hormigón y la configuración es inestable. Naturalmente, el análisis es muy simplificado: los momentos flexores elevados desaparecen cuando se produce la primera fisura. A pesar de la simplicidad del análisis, los resultados presentados en la Tabla 4.1 permiten presumir que el conducto debió fisurarse desde el momento mismo de su construcción y puesta en servicio.

La presión interior provocaba un aumento significativo de ER porque se reducía el esfuerzo axial en el anillo estructural. Sin embargo, esta operación producían poco daño porque encontraban al conducto firmemente rodeado por suelos que, aunque blandos, ofrecían una reacción estabilizante relativamente importante.

En la Tabla 4.2 se presentan las solicitaciones estructurales producidas por la construcción del Supermercado, por la erosión parcial de los suelos y por la presión interior. La erosión parcial se simuló como una reducción de rigidez y resistencia del 50% para los suelos que rodeaban la clave del conducto.

Tabla 4.1. Solicitaciones estructurales de la clave para algunos estados de carga, si se asume comportamiento elástico.

	N [kN]	M [kNm]	ER	$\sigma$ [kPa]
Constr. Supermercado	241	76	63%	1342
Erosión parcial de suelos	360	137	77%	2568
Erosión + presión interior	225	137	121%	2838

Puede apreciarse que la construcción del supermercado – se simuló el abatimiento de napa y la excavación – produjeron una  $ER=63%$ , mucho menor que la que producía la presión interior. El efecto de la hincas de los pilotes – probablemente significativo para el problema – no pudo ser modelado con las herramientas disponibles. Por otra parte, el efecto de la erosión de los suelos es evidente en la Tabla 4.2: las tensiones de tracción se duplican.

En resumen, el conducto, diseñado para  $ER < 17%$ , soportaba desde su instalación  $ER=57\%-141%$  y por lo tanto estaba fisurado. La obra vecina generaba  $ER=63%$ , por lo que probablemente no produjo cambios significativos en el estado tensional del conducto.

Sin embargo, no puede soslayarse el efecto de la hincas de los pilotes sobre el desenlace de la situación. Los pilotes atravesaron los suelos blandos superficiales y penetraron algunos metros en los suelos compactos del Pampeano. Las vibraciones producidas por la hincas se propagaron por el Pampeano e incidieron en la base del conducto. Aunque es evidente que estas vibraciones no pudieron romper una estructura sana, es muy difícil establecer hasta qué punto pudieron abrir las fisuras preexistentes que este análisis sugiere que había y que se ven en la Fig. 4.5.

Evidentemente, se produjo la apertura de alguna fisura hasta el punto que comenzó el proceso de entrada de suelos (las fisuras pasan a denominarse grietas). En este punto el sistema se convierte en inestable, y el colapso es sólo cuestión de tiempo. Dependiendo de la magnitud de la fisura, el colapso puede hacerse evidente en la superficie del terreno en unas pocas semanas, meses o años, e incluso muchos años después de iniciado el proceso. Por eso es que no puede establecerse con certeza que fueron los pilotes los que abrieron las fisuras.

Lo que sí puede darse por probado es que las fisuras existían desde hace muchísimos años, y que una inspección cuidadosa del conducto las habría detectado con toda seguridad.

#### 4.5 Lecciones

La primera lección que se aprende de esta experiencia es que no deben ejecutarse túneles de hormigón simple en suelos erosionables.

En la técnica moderna de construcción convencional de túneles, la existencia de grandes fisuras se evita mediante el empleo de armaduras y mediante la colocación de dos estructuras desfasadas: el sostenimiento primario y el revestimiento definitivo.

Cuando los túneles se ejecutan con máquinas tuneladoras, el diseño de las dovelas y sus juntas tiene en cuenta los requerimientos de estanqueidad de la obra. Además, se inyecta pasta de cemento por detrás de las dovelas, para asegurar un contacto

íntimo entre dovelas y terreno y para sellar entradas de suelo.

La lección tiene aplicación inmediata. Aunque los túneles para subterráneos de Buenos Aires se ejecutan con hormigón simple (Sfriso, 2006), esta concepción no debe ser extrapolada a obras hidráulicas ni a ramales periféricos que puedan quedar rodeados o cerca de suelos erosionables.

La segunda lección es más importante: todas las obras subterráneas deben tener un programa de inspección y mantenimiento sistemáticos y periódicos. Simplemente, todavía no se conoce la técnica para construir túneles que no necesiten inspección y mantenimiento.

## 5 CONCLUSIONES

Se introdujeron algunos conceptos y ejemplos de patología de túneles y de la influencia de los métodos constructivos. Se mostró que las condiciones geotécnicas, el diseño, el comportamiento del agua freática y el destino de una obra

subterránea influyen en su desempeño a lo largo del tiempo.

Estos conceptos se aplicaron al caso del colapso de la III Cloaca Máxima, ocurrido en 1997 en Pompeya, Buenos Aires. Se describieron los hechos, se detallaron los factores condicionantes principales y se efectuó un análisis simple que permite mostrar como un diseño defectuoso, mal elegido para las desfavorables condiciones geotécnicas imperantes, se convirtió en una obra vulnerable que falló cincuenta años después de construida.

## ANEXOS

- Sfriso, A. (2006). "Algunos proc. constructivos para la ejecución de túneles urbanos", XIII CAMSIG, San Juan.
- Sfriso, A. (2007). "Procedimiento Constructivo de la Estación Corrientes del Subterráneo de Buenos Aires, Argentina". VI Chilean Conf. Geot. Eng., 124-132.
- Sfriso, A. (2008). "Metro tunnels in Buenos Aires: Design and construction procedures 1998 – 2007", Sixth Int. Symp. Geot. Aspects Underground Constr. in Soft Ground (IS-Shanghai 2008).