

Los suelos atravesados por los túneles están sobreconsolidados por desecación con una presión equivalente de tapada de al menos 1.0 MPa . El coeficiente de empuje en reposo K_0 no fue medido. A partir de la historia geológica del depósito, se infiere que K_0 debe estar en el rango $0.55 - 0.70$ en el Pampeano Superior y $0.65 - 0.80$ para mayores profundidades (Núñez 1986, Sfriso 2006). La práctica actual incluye un análisis de sensibilidad a K_0 y el diseño de las estructuras definitivas con los resultados más desfavorables (Bolognesi 1991, Sfriso 2006).

La modelización numérica se efectúa con el modelo hiperbólico (Duncan 1970, Vermeer 1998). En la Tabla 2.1 se presentan los parámetros mínimos y máximos representativos del Pampeano (Sfriso 2006). El significado de los diferentes parámetros puede encontrarse en (Vermeer 1998).

Tabla 2.1. Parámetros mecánicos típicos de suelos del Pampeano

			Relleno		Superior		Medio		Inferior	
		un.	min	max	min	max	min	max	min	max
Cohesión y ángulo de fricción no drenados	c_u	KPa	20	50	50	100	110	220	40	80
	ϕ_u	°	8	15	10	20	5	20	0	5
Cohesión y ángulo de fricción efectivos	c'	KPa	0	5	10	25	25	50	15	30
	ϕ'	°	28	30	28	31	30	34	28	31
Dilatancia	ψ	°	0	0	0	3	0	6	0	3
Mód. Young secante 50%	$E_{50 \text{ ref}}$	MPa	10	20	60	100	75	150	60	100
Mód. Young elástico	$E_{ur \text{ ref}}$	MPa	25	50	150	250	180	300	140	200
Exponente de Jambu	m	-	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Módulo de Poisson	ν	-	0.20	0.20	0.30	0.30	0.30	0.30	0.35	0.35
Relación de falla	R_f	-	0.85	0.85	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90

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. 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 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, 2000, Bolognesi 1991).
- 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.
- El Pampeano inferior no estuvo expuesto a desecación, tiene cementación calcárea pobre o ausente (Fidalgo 1975, Núñez 1986), y por lo tanto tiene un comportamiento poco seguro cuando se excavan en él largas galerías sin sostenimiento.

3. PROCEDIMIENTOS CONSTRUCTIVOS PARA TÚNELES (1998-2007). Los procedimientos constructivos para túneles difieren en el orden y manera en que se construyen las diferentes partes de la obra. Descriptos de manera sucinta, los métodos usados en los subterráneos 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.

4 PROCEDIMIENTOS CONSTRUCTIVOS PARA ESTACIONES. Entre 1998 y 2007 se construyeron quince estaciones, de las cuales once fueron ejecutadas a cielo abierto. Las restantes son Once (2002-2003), Echeverría (2005-2007), Villa Urquiza (2006-2007) y Corrientes (2007). En la Estación Once se ejecutaron primero los accesos laterales – galerías de unos seis metros de ancho – que funcionaron como hastiales de la caverna principal. Las estaciones Echeverría y Villa Urquiza tienen aproximadamente la misma caverna principal; ambas fueron ejecutadas por el método alemán. Por último, la Estación Corrientes – objeto de este trabajo – se descartó el método alemán y se eligió la excavación a sección completa con bancos intermedios.

5 MOTIVACIÓN PARA EL CAMBIO DE PROCEDIMIENTOS CONSTRUCTIVOS. El diseño del procedimiento constructivo de la Estación Corrientes comenzó mientras se ejecutaba la Estación Echeverría. En ésta se empleó el método alemán convencional (Fig. 2), al que se le agregaron algunas galerías auxiliares dispuestas en forma transversal al eje de la estación. Durante la excavación de hastiales y galerías auxiliares, y antes de la construcción de la caverna principal, se observó la aparición de algunas fisuras en el revestimiento de éstas galerías auxiliares y un asentamiento superficial de casi 10 mm, superior a lo previsto en los modelos ejecutados en etapa de diseño. Esta observación condujo a la instalación de apuntalamientos en las galerías auxiliares abandonadas (Fig. 3). El análisis inverso del problema (Fig. 4) mostró que la red de galerías auxiliares generó la aparición de pilares desconfiados de terreno, lo que se tradujo en una significativa reducción de la seguridad global. En efecto, el modelo original informaba una falla convencional de frente, mientras que el modelo que incluyó las galerías informó una falla de los pilares de suelo por delante del frente (Fig. 5). Un tercer modelo, que incluyó las galerías con su sostenimiento, reprodujo razonablemente las mediciones del terreno. En la tabla 5.1 se muestra la comparación entre los resultados del modelo original y los que incorporan las galerías auxiliares.

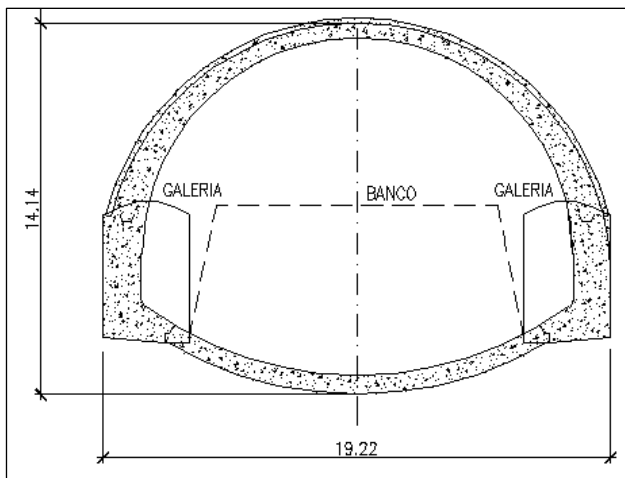


Fig. 2. Método constructivo de la Estación Echeverría.

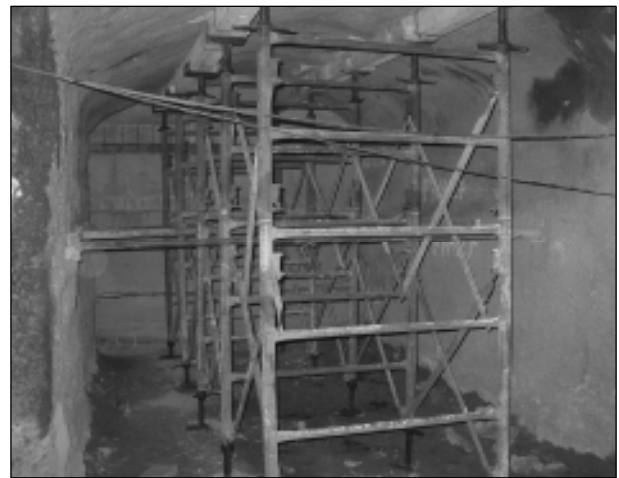


Fig. 3. Apuntalamiento temporal en galerías auxiliares abandonadas, Estación Echeverría.

Tabla 5.1. Comparación entre modelos de la Estación Echeverría y mediciones en el sitio.

	Asentamiento superficial		Coef. de seguridad	Modo de falla
	Excav. galerías mm	Excav. bóveda mm		
Sin galerías auxiliares	2.4	13.5	1.50	Falla de frente de bóveda principal
Con galerías auxiliares sin sostenimiento	28.0	37.0	1.15	Falla de los pilares de suelo entre galerías
Con galerías auxiliares con sostenimiento	15.6	22.5	1.45	Falla de frente de bóveda principal
Mediciones en el terreno	9.2	16.7	-	-

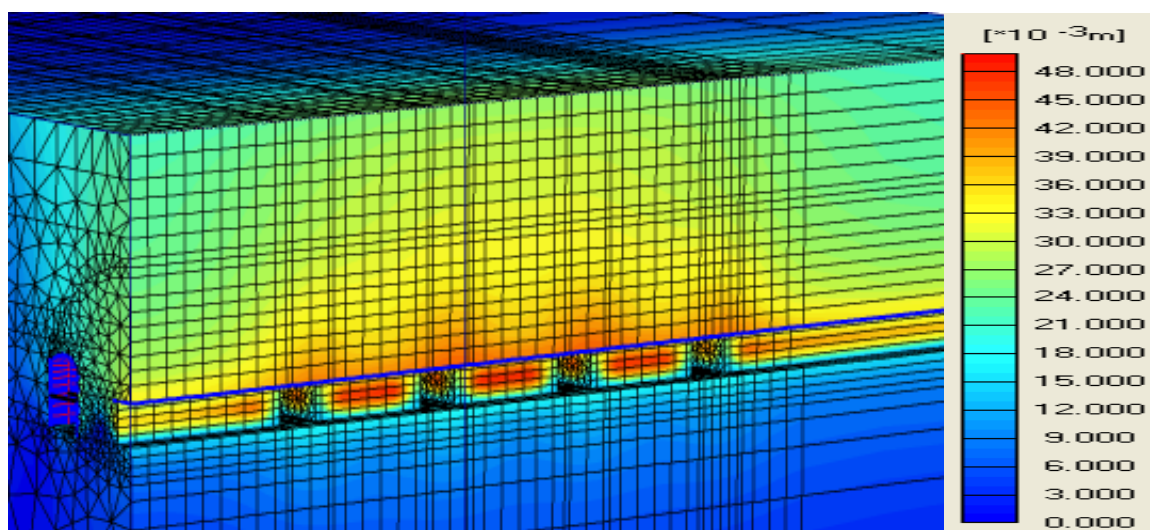
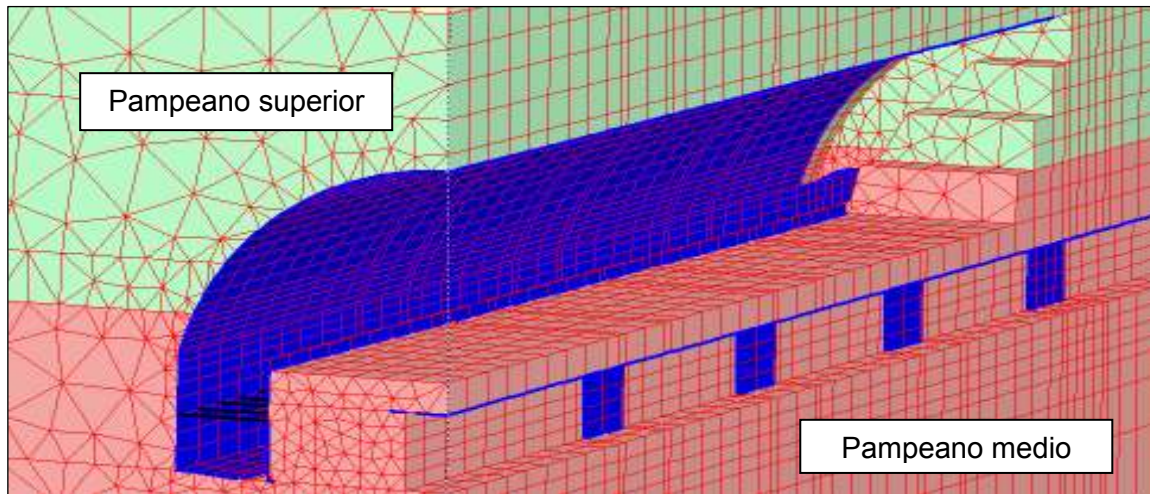


Fig. 4. Análisis inverso del procedimiento constructivo de la Estación Echeverría. 4a: Malla. En azul, el revestimiento de hormigón proyectado. 4b: Desplazamientos calculados al fin de la construcción de las galerías y antes de la excavación de la bóveda.

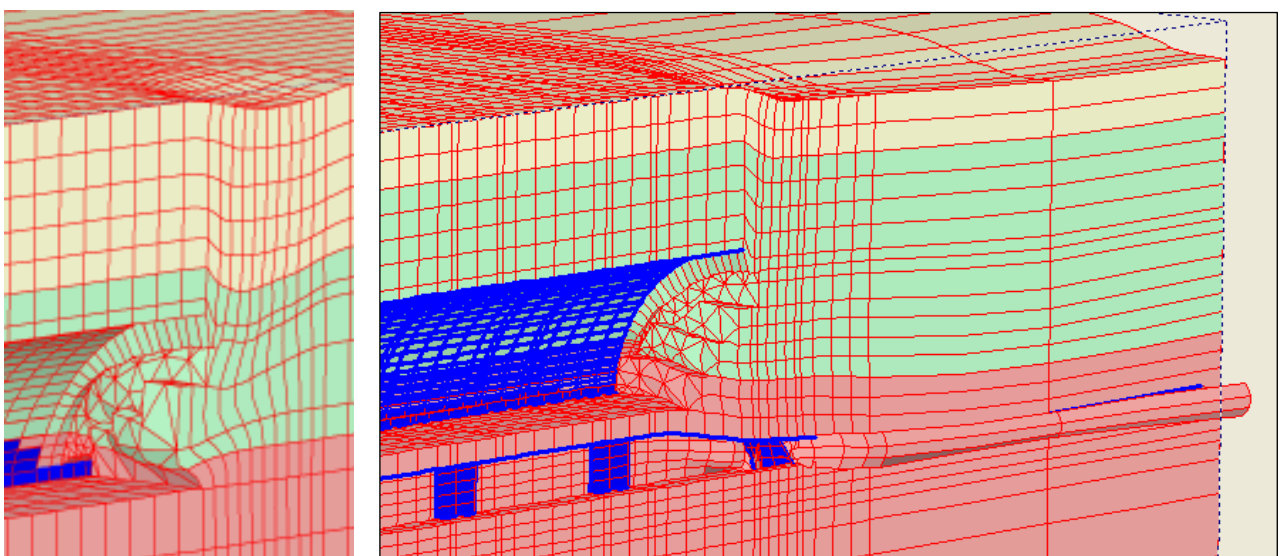


Fig. 5. Modos de falla informados por los modelos de la Estación Echeverría. 5a: Falla de frente del modelo que no incorpora las galerías (FS = 1.50). 5b: Falla de los pilares de suelo formados por las galerías en el modelo que las incorpora (FS = 1.15).

6 DESCRIPCIÓN DE LA ESTACIÓN CORRIENTES. La Estación Corrientes es una caverna subterránea cuyas dimensiones de excavación son 18.9 m de ancho, 14.1 m de altura y 135 m de longitud, con una tapada de 9.0 metros. Sobre esta caverna principal, y en una longitud de 51 m, existe otra caverna que alberga el vestíbulo de la estación, de 17.2 m de ancho y 6.0 m de altura con una tapada de sólo 3.6 metros. Las dimensiones interiores de la estación son 17.5 m x 13.5 m x 134 m (Fig. 6).

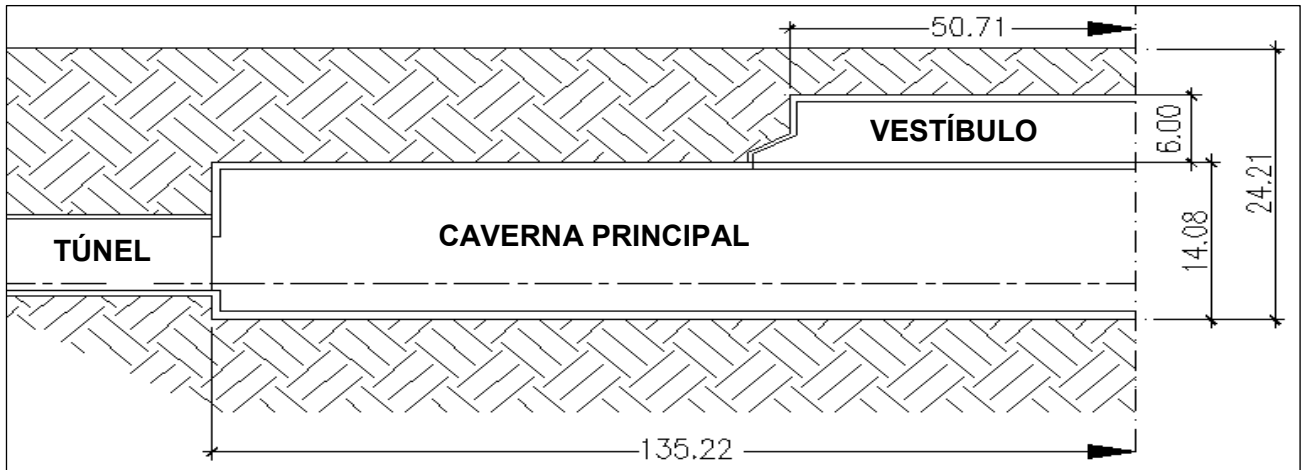


Fig. 6. Croquis longitudinal de la Estación Corrientes.

7 PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO DE LA ESTACIÓN CORRIENTES. La Estación Corrientes se excavó a sección completa en cuatro bancos: B1 (cota: 11.88m), B2 (cota: 8.88 m), B3 (cota: 6.46 m) y B4 (cota: 3.96 m). La secuencia de operaciones es: i) Excavación B1 pase n, avance 1.0 m; ii) Colocación de cercha metálica; iii) Colocación de hormigón proyectado 15 cm y colocación de segunda capa de hormigón proyectado 15 cm en pase n-1; iv) Se repite secuencia hasta acumular avance B1 de 5.0 m; v) Excavación B2 pase n avance 2.5 m; vi) Colocación de hormigón proyectado 30 cm; vii) Se repite secuencia hasta acumular avance B2 de 5.0 m; viii) Excavación B3 pase n avance 2.5 m; ix) Se repite secuencia hasta acumular avance B3 de 5.0 m; x) Excavación B4 pase n avance 5.0 m; xi) Hormigón moldeado de solera; xii) Se repite secuencia completa en toda la longitud de la caverna; xiii) Colocación de membrana adherida; xiv) Hormigón moldeado del revestimiento secundario y tímpanos (Fig. 7 a 10). Luego se continúa con la excavación del vestíbulo xv) Excavación a sección completa avance 1.0 m; xvi) Colocación de cercha metálica; xvii) Colocación de hormigón proyectado 15 cm y colocación de segunda capa de hormigón proyectado 10 cm en pase n-1; xviii) Se repite secuencia completa en toda la longitud del vestíbulo; xix) Hormigón moldeado del revestimiento secundario y tímpanos en vestíbulo.

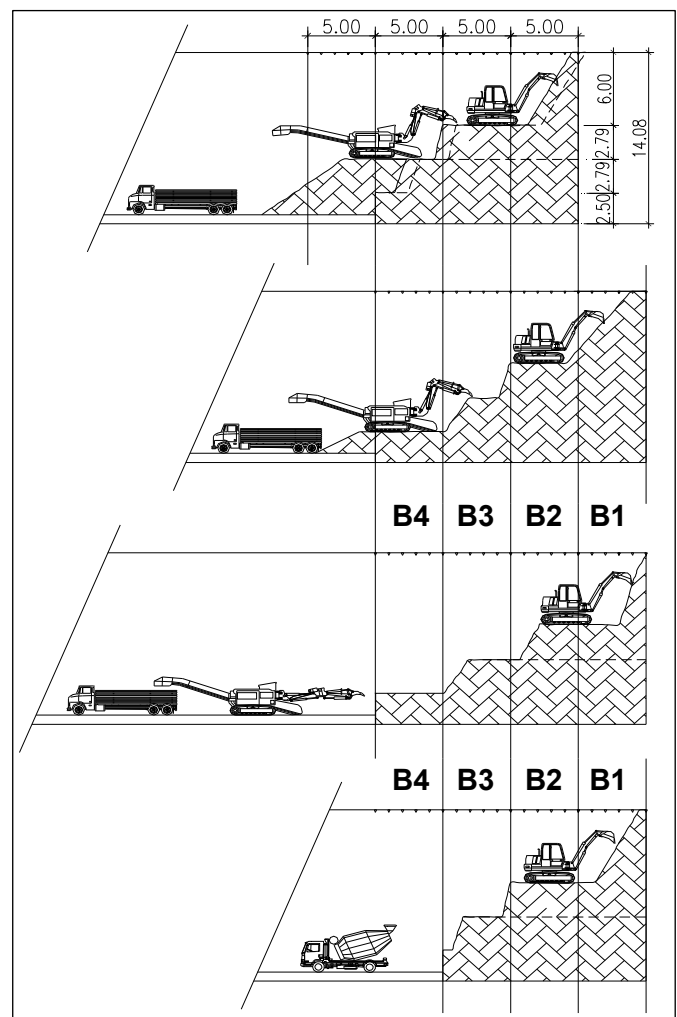


Fig. 7. Croquis longitudinal del procedimiento constructivo de la Estación Corrientes.

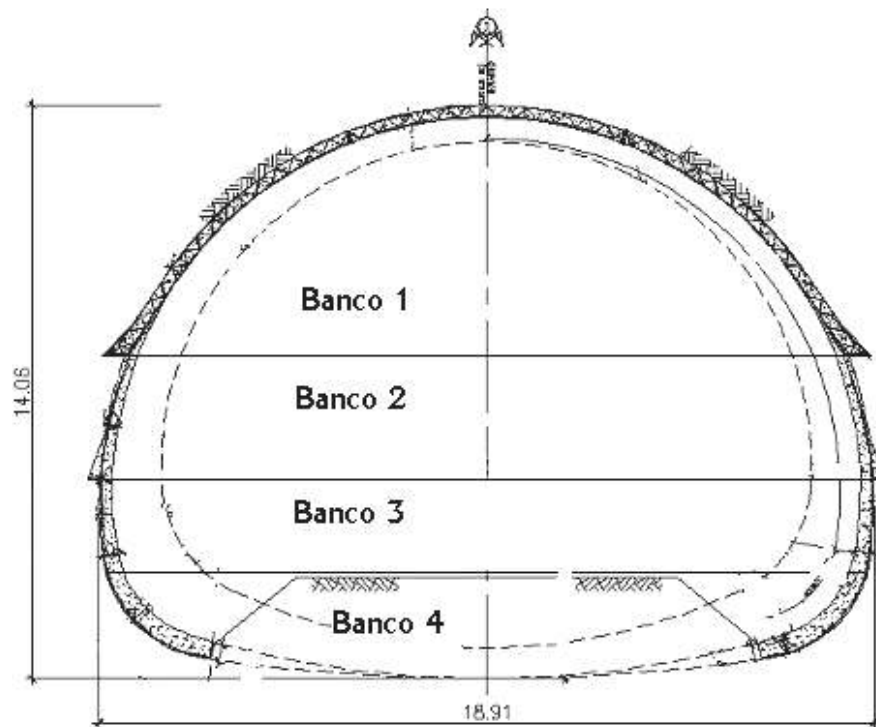


Fig. 8. Croquis transversal del procedimiento constructivo de la Estación Corrientes.

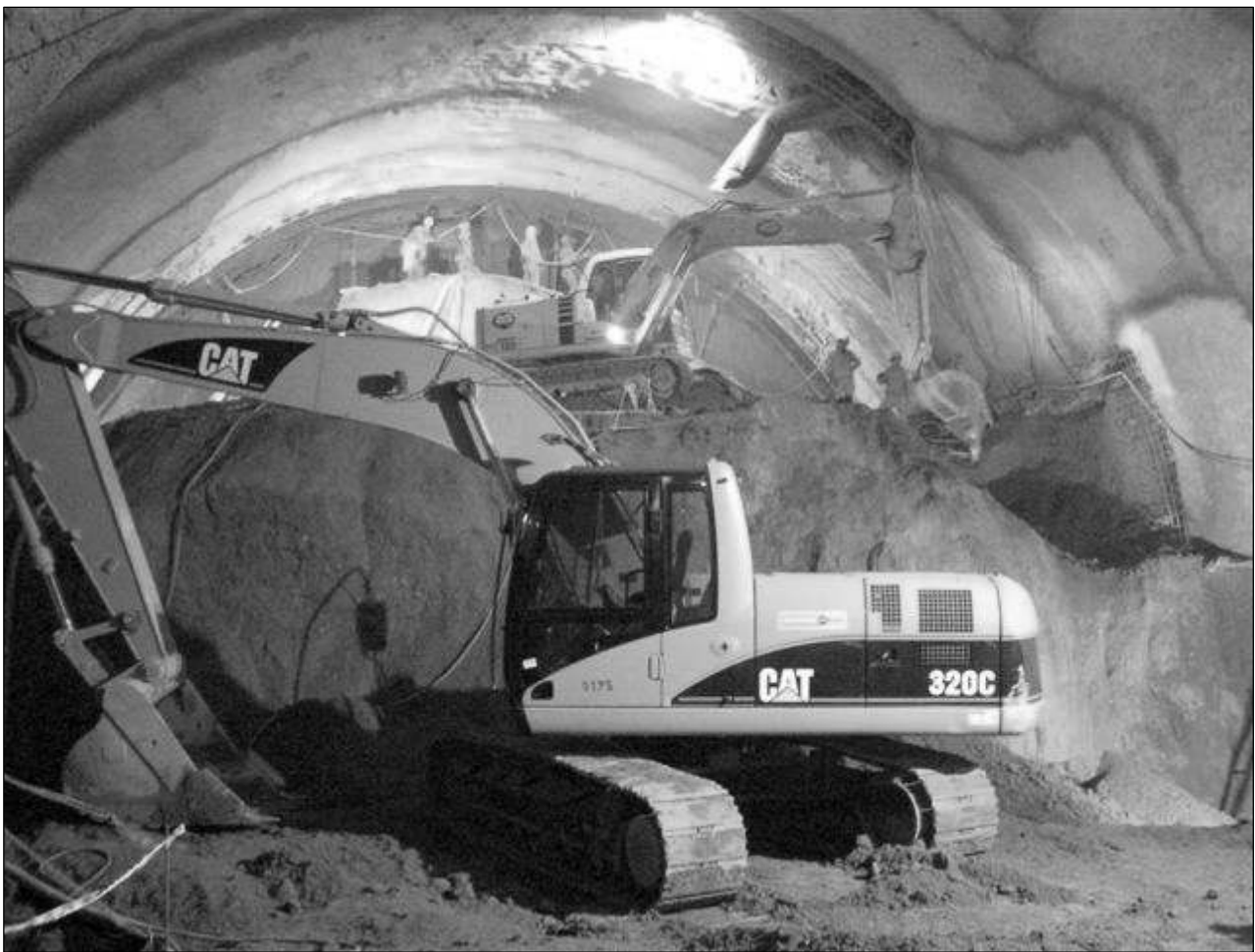


Fig. 9. Vista de la caverna principal durante su construcción. Se aprecian dos retroexcavadoras grandes trabajando en paralelo.



Fig. 10. Otra vista de la caverna principal durante su construcción. Las etapas de excavación pueden verse por las marcas en el sostenimiento de hormigón proyectado .

8 MODELIZACIÓN NUMÉRICA DEL PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO. La modelización numérica del procedimiento constructivo de la Estación Corrientes partió por una estimación preliminar de las necesidades de sostenimiento. Para esto se emplearon expresiones analíticas derivadas para secciones circulares (Núñez 1996, 2007).

$$N = \frac{1}{2} \left(K_0 + \frac{2}{3} \frac{1-K_0}{1+a} \right) \frac{2D-A}{3D} p_v D \quad [1]$$

$$M = \frac{1-K_0}{16} \frac{a}{1+a} \frac{2D-A}{3D} p_v D^2 \quad [2]$$

$$a = 16 \frac{E_r (1-\nu^2)}{E (1-\nu_r^2)} \left(\frac{e}{D} \right)^3 \quad [3]$$

donde N es la normal en la clave, M es el momento flexor en la clave, p_v es la presión vertical en la clave, D es el diámetro medio de la caverna, A es el avance sin sostenimiento, E y ν son los parámetros elásticos del terreno, E_r y ν_r son los parámetros elásticos del sistema de sostenimiento. Para el caso de la Estación Corrientes se tiene

$$D = \sqrt{BH} = \sqrt{18.8m \cdot 14.1m} = 16.3m \quad [4]$$

$$a = 16 \frac{E_r (1-\nu^2)}{E (1-\nu_r^2)} \left(\frac{e}{D} \right)^3 = 16 \cdot \frac{15GPa \cdot (1-0.2^2)}{150MPa \cdot (1-0.16^2)} \left(\frac{0.30m}{16.3m} \right)^3 = 0.01 \quad [5]$$

$$N = \frac{1}{2} \left(K_0 + \frac{2}{3} \frac{1-K_0}{1+a} \right) \frac{2D-A}{3D} \left(\gamma \left(D_f + \frac{H}{2} \right) \right) D =$$

$$\frac{1}{2} \cdot \left(0.7 + \frac{2}{3} \frac{1-0.7}{1+0.01} \right) \cdot \frac{2 \cdot 16.3m - 2m}{3 \cdot 16.3m} \cdot \left(19 \frac{KN}{m^3} \cdot \left(9m + \frac{14.1m}{2} \right) \right) \cdot 16.3m = 1396 \frac{KN}{m}$$

$$M = \frac{1-K_0}{16} \cdot \frac{a}{1+a} \cdot \frac{2D-A}{3D} \left(\gamma \left(D_f + \frac{H}{2} \right) \right) D^2 =$$

$$\frac{1-0.7}{16} \cdot \frac{0.01}{1+0.01} \cdot \frac{2 \cdot 16.3m - 2m}{3 \cdot 16.3m} \cdot \left(19 \frac{KN}{m^3} \cdot \left(9m + \frac{14.1m}{2} \right) \right) \cdot (16.3m)^2 = 11 KNm / m$$

Con estas solicitaciones se dimensionó el espesor de revestimiento y sus armaduras. El análisis se completó con modelos numéricos elastoplásticos en los que se simularon todas las etapas del procedimiento constructivo y se calcularon la seguridad, solicitaciones y deformaciones de cada etapa (Fig. 11 y 12). En el caso particular de la Estación Corrientes se emplearon los paquetes de cálculo Plaxis 2D y 3D/Tunnel (Vermeer 1998).

Se empleó el modelo hiperbólico incorporado en Plaxis con los parámetros máximos de la Tabla 2.1. Los estratos fueron divididos en: Pampeño Superior: Superficie a 8 m de profundidad; Pampeño Medio: 8 m a 20 m de profundidad; Pampeño Inferior: más de 20 m de profundidad. Los resultados se indican en las Tabla 8.1 a 8.3. Puede verse el buen acuerdo entre los resultados mostrados en la tabla 8.1 y los calculados con las expresiones 4 a 7.

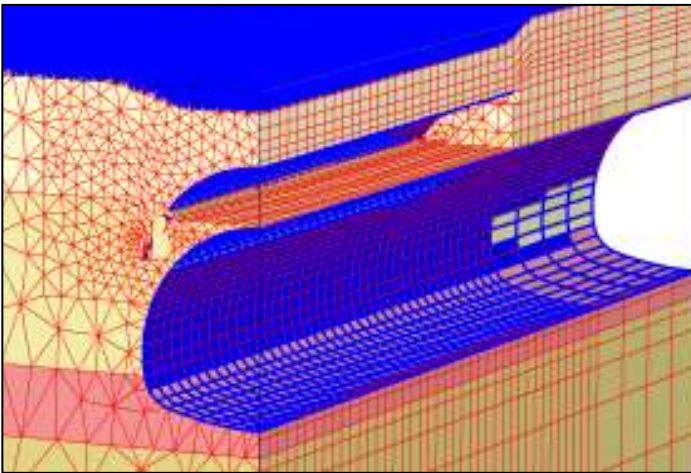


Fig. 11. Forma de falla del vestíbulo superior.
Se obtuvo FS>2.5 en condiciones drenadas.

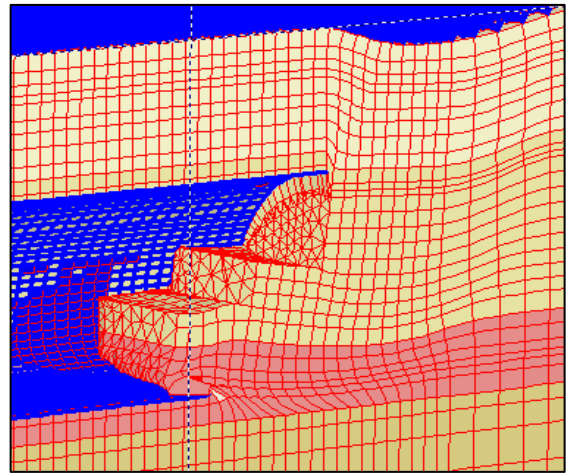


Fig. 12. Forma de falla de la caverna.
Se obtuvo FS>2.8 en cond. drenadas.

SBASE exige que el revestimiento de segunda etapa se diseñe con procedimientos basados en la teoría de viga sobre medio elástico. De acuerdo a estas exigencias, se ignoran la existencia del revestimiento primario y el efecto del procedimiento constructivo sobre las solicitaciones del revestimiento de segunda etapa.

Tabla 8.1. Solicitaciones estructurales del sostenimiento de primera etapa de la caverna principal.

		Clave (0°)		Hombros (45°)		Hastiales (90°)		Solera (180°)	
		M KNm/m	N KN/m	M KNm/m	N KN/m	M KNm/m	N KN/m	M KNm/m	N KN/m
Solicitaciones calculadas	3D	15	1130	35	1060	101	1000	251	1130
	2D	15	1325	15	1560	141	1910	70	1700
Adoptado		15	1130	35	1060	141	1910	251	1130

Tabla 8.2. Solicitaciones estructurales del sostenimiento de primera etapa del vestíbulo superior.

		Clave (0°)		Hombros (45°)		Hastiales (90°)		Solera (180°)	
		M KNm/m	N KN/m	M KNm/m	N KN/m	M KNm/m	N KN/m	M KNm/m	N KN/m
Solicitaciones calculadas	3D	4	504	10	529	5	528	61	432
	2D	10	660	11	707	5	643	60	480
Adoptado		4	504	10	529	5	528	61	432

Tabla 8.3. Desplazamientos del sostenimiento de primera etapa.

	Superficie		Clave		Pie de hastial	
	Frente mm	Final mm	Frente mm	Final mm	Frente mm	Final mm
Caverna principal	7.0	20.6	8.5	22.4	2.5	5.0
Vestíbulo	-0.4	9.8	-0.4	11.9	0.1	0.5

9 COMPORTAMIENTO OBSERVADO. La caverna principal se excavó en seis meses y medio. No se registraron incidentes ni desvíos del programa de trabajos, lo que debe ser atribuido a una muy buena organización logística y programación industrial, y a un buen desempeño de los equipos de construcción. A a fecha la obra está en etapa de construcción del revestimiento secundario de hormigón moldeado de la caverna principal y en comienzos de excavación del vestíbulo superior. Los asentamientos superficiales en el plano de excavación de la caverna principal estuvieron en el rango 5 – 10 mm. Los asentamientos estabilizados estuvieron en el rango 6 – 14 mm. Estos asentamientos son del orden de la mitad de los previstos. Se estima que la razón de esta disconformidad está dada porque el módulo de Young elástico, que determina la magnitud del ascenso de solera por descarga, es inferior al valor $E_{u\ ref} = 300\ MPa$ asumido para el Pampeano Medio. También, la resistencia no drenada de los suelos parece haber sido superior a la asumida, por lo que la rigidez media en carga pudo haber sido algo más alta que la calculada.

10 OPORTUNIDADES DE PROGRESO. El progreso en las técnicas de diseño y construcción continua. Las oportunidades remanentes identificadas son: i) el desarrollo de técnicas confiables para la medición del estado tensional del terreno y el coeficiente de empuje en reposo; ii) el abandono del hormigón moldeado en bóvedas de túneles y galerías auxiliares; iii) el empleo de robots para la colocación de hormigón proyectado; iv) la implementación de sistemas de control topográfico más eficientes que la medición manual; v) la optimización en el uso de cerchas de acero; y vi) un mejor control del agua freática durante la construcción.

11 CONCLUSIONES. Se presentó una descripción de la Estación Corrientes, de su sostenimiento de primera etapa y de su procedimiento constructivo. Con el procedimiento descripto, una caverna de 19 m x 14 m x 135 m, con una tapada de 9 m, fue excavada en seis meses y medio con asentamientos superficiales del orden de los 10 mm y sin incidentes durante su construcción. Se discutió la disconformidad entre asentamientos medidos y calculados y se identificaron algunas oportunidades de progreso en los procedimientos constructivos para tunelería urbana en Buenos Aires.

12 RECONOCIMIENTOS. El avance en los métodos constructivos para obras subterráneas se debe al trabajo continuado de los profesionales de SBASE y de las empresas involucradas: Techint, Dycasa y Roggio. En el caso de la Estación Corrientes, los directivos y personal técnico de Dycasa respaldaron e implementaron las propuestas presentadas en este artículo y las acompañaron con una excelente programación de obra. J. Laiún ejecutó gran parte de los modelos numéricos de esta obra. El prof. E. Núñez inició al autor en la tunelería y actúa como fuente permanente de consulta en cada uno de los proyectos.

REFERENCIAS

- Bolognesi, A. (1975). "Compresibilidad de los suelos de la Formación Pampeano". V PCSMFE, Buenos Aires, V: 255-302.
- Bolognesi, A. y Vardé, O. (1991). "Subterráneos en Buenos Aires". IX PCSMFE, Viña del Mar, Chile, III:1329-1350.
- Duncan, J. y Chang, C. (1970). "Nonlinear analysis of stress and strain in soils". JSMFD ASCE, 96, SM5, 1629-1653.
- Einstein, H. y Schwartz, C. (1979). "Simplified analysis for tunnel supports". JGED, ASCE, 105, 4, 499-518.
- Fidalgo, F., De Francesco, F. y Pascual, R. (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 Micucci, C. (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.
- Núñez, E. (2007). "Casagrande lecture: Uncertainties and Approximations in Geotechnics". XIII PCSMGE, Venezuela.
- 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). "Algunos procedimientos constructivos para la ejecución de túneles urbanos". XIII CAMSIG, Argentina, 1-17.
- Vermeer, P. (1998). "Plaxis Users Manual". Balkema, Rotterdam. Ne, 477 p.