

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LOS TÚNELES DEL EJE 5 PONIENTE

René Contreras G.
José A. Segovia P.
Ernesto Holguín
Enrique Santoyo V.

INTRODUCCIÓN

En nuestro país los túneles urbanos para vehículos son apenas unos cuantos; los más importantes hasta ahora son los de la Loma Larga en la ciudad de Monterrey que han facilitado la comunicación al surponiente de la ciudad; la red de túneles más peculiar está en la ciudad de Guanajuato, fueron excavados en roca dura con técnica minera y son indispensables para la movilidad de los vehículos que ya era imposible hacerla en la superficie; en Tlaxcala, el pequeño túnel Joaquín Cisneros ha sido capaz de desahogar el acceso al centro de la ciudad. En la ciudad de México, los túneles de Vista Hermosa han simplificado el cruce bajo la carretera a Toluca y ahora los túneles del Eje 5 Poniente son un ejemplo de solución vial, que seguramente estimulará en los años venideros la construcción de túneles como la mejor alternativa para descongestionar el poniente de la ciudad.

La metodología aplicada para el diseño enfatiza la determinación precisa de las condiciones estratigráficas y propiedades mecánicas de los materiales que atravesará el túnel; con el proyecto así definido, durante la construcción de los túneles del Eje 5 Poniente pudo controlarse la longitud del avance frontal para asegurar la estabilidad y minimizar las deformaciones en superficie; apenas excavado un tramo, de inmediato se verifican las particularidades estratigráficas locales del frente y del material de apoyo del revestimiento de concreto y se procede a colocar la primera capa estabilizadora de concreto lanzado formando una bóveda con zapata corrida de apoyo; cuando se detectan bloques expuestos a caer se colocan las anclas necesarias para estabilizarlos. A continuación se procede a engrosar el concreto lanzado y se construye la bóveda inferior o cubeta para completar la sección ovoide del túnel; finalmente se rellena la cubeta para conformar la superficie de rodamiento.

GENERALIDADES SOBRE LOS TÚNELES 5 PONIENTE

Dimensiones. Los túneles se han identificado como ejes 10 y 20 (**Fig. 1**) con longitudes de 296.6 y 266.0 m, cuenta con banquetas de 1.5 m de ancho para servicio y alojar tuberías. La geometría de la sección transversal es un ovoide con tres radios de curvatura que definen 11.8 m de ancho y 7.75 m de altura, **Fig. 2**; los gálibos horizontal y vertical son 7.0 y 5.5 m, respectivamente.

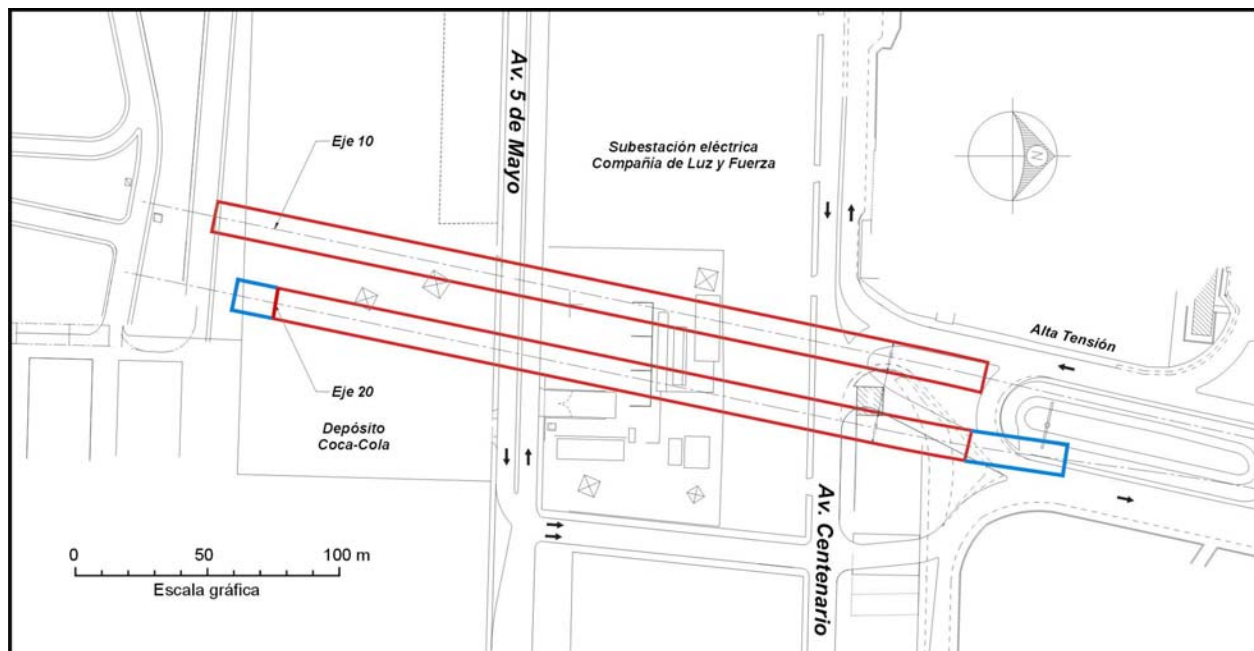


Fig. 1 Túneles del Eje 5 Poniente

Entorno. En la superficie se tienen varias estructuras y dos vialidades que obligaron a garantizar la seguridad y empeñarse en que los asentamientos fueran mínimos, en particular para las instalaciones de la Subestación Eléctrica San Ángel de la Compañía de Luz y Fuerza del Centro que impusieron valores máximos a los asentamientos diferenciales tolerables por los equipos sensibles de la batería de conectores con aislamiento de hexafloruro (Unidad de Hexafloruros), que controlan el suministro de electricidad a una parte importante del sur de la ciudad; además existe una Bodega de Refrescos, al que llegan numerosos vehículos de carga y se almacenan temporalmente pilas de esas bebidas. También se vigiló la funcionalidad de las avenidas Centenario y 5 de Mayo con intenso flujo vehicular, incluso de camiones pesados; en la **Fig. 1** se muestra la ubicación de esas instalaciones.

Alineamiento vertical. La posición vertical de los Túneles 5 Poniente quedó condicionada por los niveles de la vialidad y se ajustó para la mejor congruencia con los detalles geológicos del sitio; así la cobertura de suelo sobre la clave de los túneles varió entre 4.5 y 10.0 m: la primera corresponde a la zanja del depósito de aceite de la Unidad de Hexafloruros y la segunda, a los transformadores de la subestación, y los patios de la Bodega de Refrescos, así como en general a las superficies de las vialidades.

DISEÑO GEOTÉCNICO

Condiciones geotécnicas del sitio. Los materiales en los que se excavaron los túneles son una secuencia de las tobas volcánicas del poniente de la ciudad de México, que para algunos son rocas muy blandas y para otros suelos duros de la

formación Tarango Superior. La toba que predomina es una café areno-limosa cementada con lentes de arena pumítica, tiene intercalaciones de arenas azules débilmente cementadas poco limosas y con gravas y boleos aislados; la cohesión de estas tobas es reducida, pero su resistencia al corte es alta gracias a su ángulo de fricción interna.

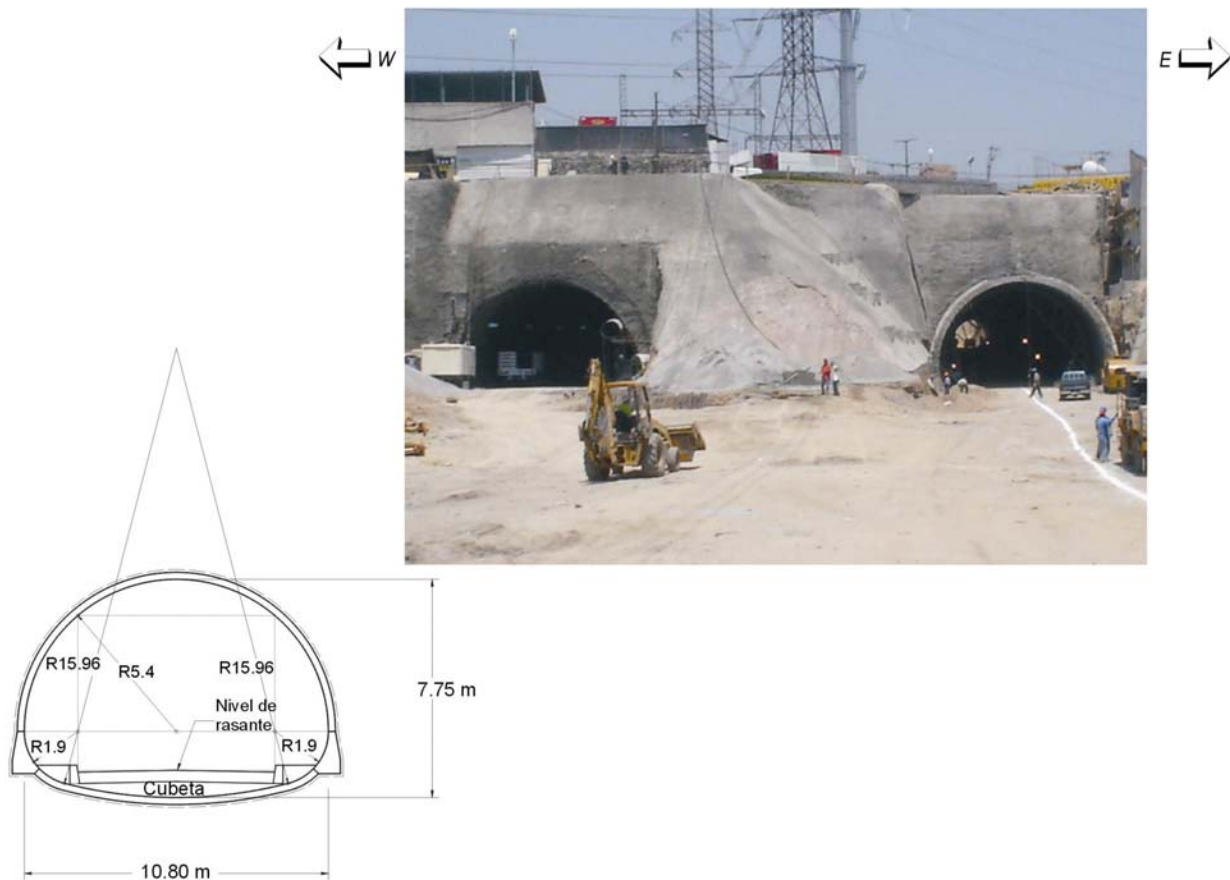


Fig. 2 Sección transversal de los túneles

La exploración geotécnica se basó en pozos a cielo abierto profundos que permitieron la inspección directa de la estratigrafía, así como la ejecución de pruebas de corte directo y pruebas de placa para definir confiablemente las propiedades mecánicas de los materiales, esta información se complementó con sondeos de penetración estándar perforados en seco. La información estratigráfica del frente expuesto del túnel fue cuidadosamente recopilada durante la construcción, se pudieron observar así las variaciones de las tobas café, las arenas azules y las tres intercalaciones importantes de arenas pumíticas.

Estabilidad de los túneles. El proceso de la excavación y estabilización de los túneles se analizó paso a paso para cada etapa de construcción con dos herramientas técnicas: a) el Método Simplificado de Estabilidad de Túneles, MSET del Profr. Enrique Tamez (Tamez *et al.*, 1997. *Diseño Geotécnico de Túneles*. TGC Geotecnia) y

b) el Método de Elementos Finitos (Plaxis V 7.2). Con el primero se estudió la estabilidad de cada túnel durante la construcción y se evaluó numéricamente el procedimiento constructivo y con el segundo se obtuvieron los elementos mecánicos que permitieron optimizar el espesor del revestimiento y el estado de las deformaciones en la masa de suelo, incluyendo los asentamientos probables en la superficie.

El método MSET está basado en un mecanismo deducido de la observación de fallas de túneles ocurridas durante su construcción, así como en modelos de laboratorio. En la **Fig. 3** se presenta ese mecanismo que permite analizar el equilibrio de la masa de suelo al frente del túnel, el cual está formado por tres prismas:

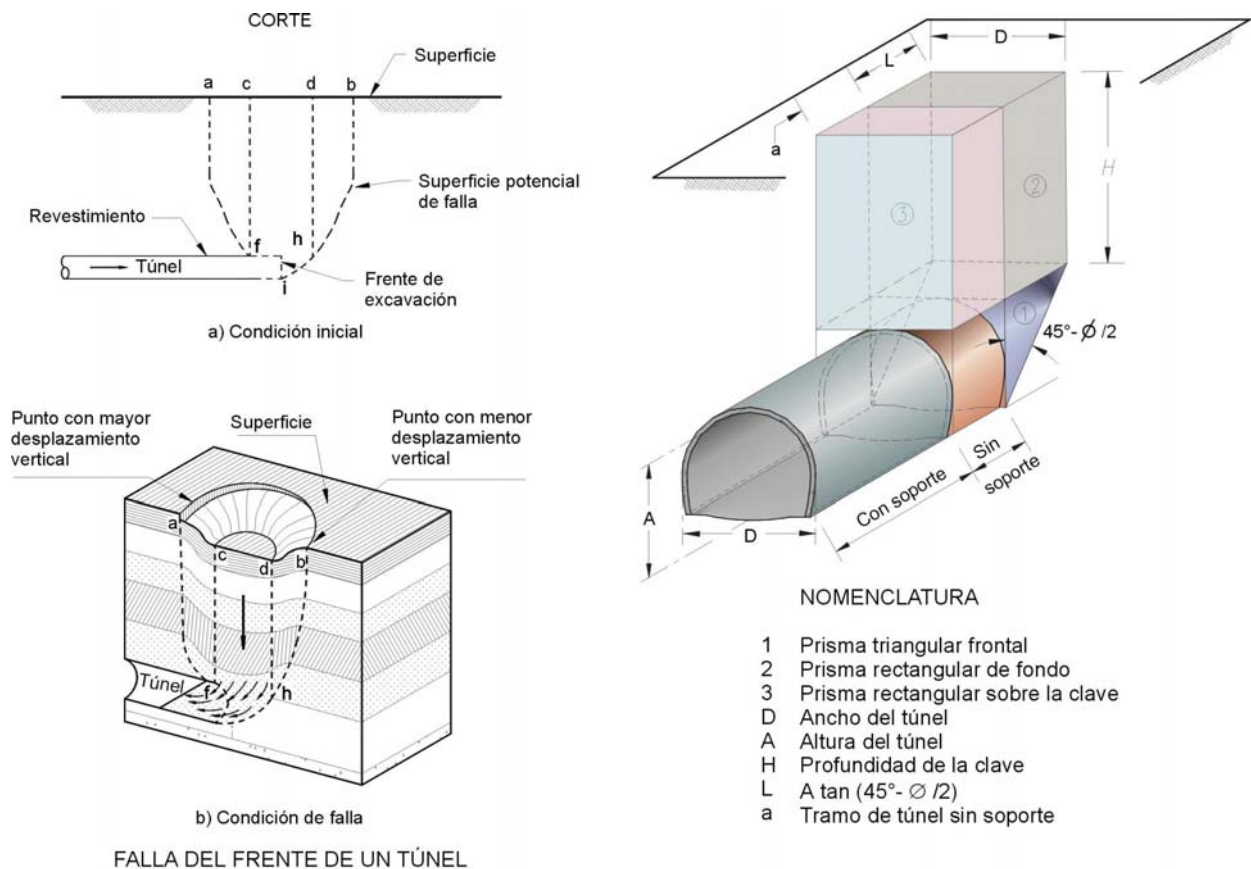


Fig. 3 Mecanismos simplificado del equilibrio del frente

Prisma 1: Se desarrolla al frente como una cuña de Coulomb.

Prisma 2: Es rectangular y se apoya sobre la cuña del frente.

Prisma 3: Es rectangular y se localiza sobre la clave de la zona sin soporte.

La condición de falla se analiza estableciendo la relación entre las fuerzas actuantes y resistentes que se desarrollan en el frente de la excavación, en la **Fig. 4** se muestra una sección longitudinal del túnel con los prismas del mecanismo de falla y

todas las fuerzas que intervienen en su equilibrio. El factor de seguridad FS se expresa como la relación conceptual entre las sumas de los momentos de las fuerzas resistentes y de los momentos de las fuerzas actuantes. Las fuerzas actuantes se deben al peso de los tres prismas, la sobrecarga superficial, la presión radial interior y la presión aplicada al frente. Las fuerzas resistentes del suelo se desarrollan en la superficie lateral de los prismas 2 y 3, considerando que la interacción horizontal entre ellos es poco significativa.

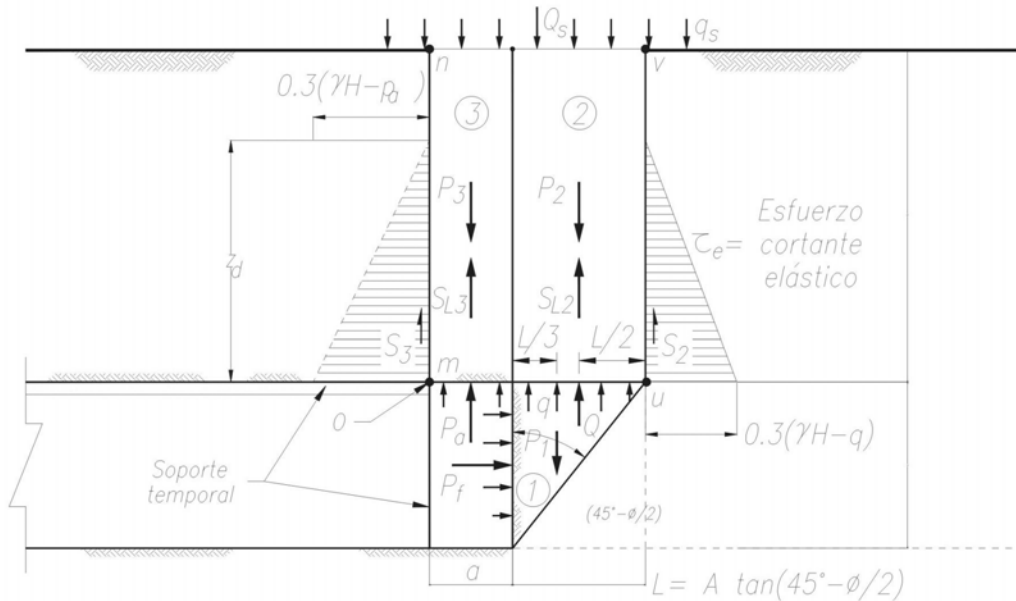


Fig. 4 Diagrama de fuerzas que intervienen en el comportamiento del frente

Al hacer la sustitución de momentos actuantes y resistentes, se obtiene la expresión para el factor de seguridad contra la falla general del frente del túnel, expresado con la ecuación 1:

$$FS_g = \frac{2s_{m2} \left[\frac{D}{L} \left(1 + \frac{a}{L} \right) + 1 + \frac{2a}{L} \right] \frac{Zd}{D} + 2s_{m3} \left(\frac{a}{L} \right)^2 \frac{Zd}{D} + 2.7c \sqrt{K_p} \left(1 + \frac{2a}{L} \right) + p_f K_p \left(1 + \frac{2a}{L} \right)}{\gamma H \left[\frac{A}{H} \left(\frac{1}{3} + \frac{a}{L} \right) + \left(1 + \frac{a}{L} \right)^2 \right] + q_s \left(1 + \frac{a}{L} \right)^2 - p_a \left(\frac{a}{L} \right)^2 - p_f K_p} \quad (1)$$

Esta ecuación permite deducir los factores de seguridad de túneles someros y profundos, los factores de influencia son:

- Las dimensiones del túnel (profundidad de la clave, ancho y altura H , D , A y a).
- Las propiedades del suelo (resistencia al cortante y peso volumétrico c , ϕ , γ).
- El procedimiento constructivo (longitud de avance a y cuando se emplea un escudo: presión de apoyo de la clave p_a y presión del frente p_f).

- Magnitud de sobrecargas en la superficie (q_s).
- Resistencia media en la cara uv del prisma 2 (s_{m2}) y en la cara mn del prisma 3 (s_{m3}).
- Altura de descarga, Z_d .
- Coeficiente de empuje pasivo, K_p .

Análisis de los Túneles del Eje 5 Poniente.

Propiedades mecánicas. Las pruebas de campo y laboratorio permitieron caracterizar el comportamiento de los materiales del sitio con las propiedades que se resumen en la **tabla 1**.

Tabla 1. Propiedades mecánicas para diseño

DESCRIPCIÓN GEOLÓGICA	DESCRIPCIÓN GEOTÉCNICA	PROPIEDADES MECÁNICAS DEL MATERIAL						
		c t/m ²	ϕ grados	E ₅₀ kg/cm ²	E _c kg/cm ²	E _d kg/cm ²	γ t/m ³	K _{PL} kg/cm ³
FORMACIÓN TARANGO SUPERIOR	Tobas pumíticas color café	8 a 20 q _u = 11.6	30 a 60	800 a 2000	800 a 1932	1000 a 3700	1.70	22 – 60
	Arenas azules	4.0	30	600	-	-	1.6	-
	Arenas pumíticas (Pómez)	2.0	20 a 30	-	366 a 550	934 a 1064	-	12 – 16

Como se trató de túneles someros excavados en suelos cohesivos – friccionantes, la ecuación general 1 se simplificó a las expresiones que se detallan a continuación.

Estabilidad del frente. Se determinó verificando el factor de seguridad para un avance nulo, el mecanismo de falla se redujo a los prismas 1 y 2 ($\alpha = 0$, **Fig. 4**); así, para túnel somero ($H-Z_d = 0$) el factor de seguridad resulta:

$$FS_f = \frac{c N_1 - 1/2 \gamma A N_2}{\gamma(A/3 + H) + q_s} \quad (2)$$

Donde los factores de estabilidad N_1 y N_2 son funciones del ángulo de fricción y el factor de seguridad se buscó que fuera siempre mayor a 2.0.

Estabilidad de la clave. La longitud de avance máximo sin soporte se definió de la estabilidad del prisma 3 para un avance a del túnel. El factor de seguridad FS_c contra la falla de la clave se obtuvo comparando la fuerza resistente total que se desarrollaba dentro del espesor Z_d con el peso total del prisma. Se obtuvo la relación:

$$\frac{D}{a} = \frac{FS_c (\gamma H + q_s)}{2[K_f c + 0.17 \gamma (H - Z_d)] Z_d / D} - 1 \quad (3)$$

Esta ecuación permitió calcular la longitud del avance que se podía excavar sin soporte, manteniendo un factor de seguridad mínimo de 2. Los análisis efectuados para los túneles del Eje 5 Poniente, dieron como resultado longitudes de avance sin soporte a desde 0.6 hasta 1.5 m, dependiendo de la toba y zona que se excavarán.

Estabilidad local de la clave. Se dedujo de la condición de equilibrio crítico del prisma 3 para un avance a , que indujera plastificación en una altura Z_p sobre la clave del túnel. El factor de seguridad contra la falla local por plastificación en la clave se evaluó como:

$$FS_p = \frac{2K_f c(1 + D/a_p)}{\gamma D} \quad \text{de la cual:} \quad \frac{D}{a_p} = \frac{FS_p \gamma D}{2K_f c} - 1 \quad (4)$$

El factor de seguridad mínimo adoptado contra la plastificación de la clave fue de 1.6; este valor aseguró que los asentamientos superficiales fueran aceptables para las estructuras e instalaciones que se encuentran encima del túnel.

Estabilidad general. El factor de seguridad contra falla general para la sección de los túneles y el avance máximo sin soporte se determinó del equilibrio de los prismas 1, 2 y 3, sustituyendo en la ecuación 2 los valores de A , D y a , así como las condiciones de frontera existentes. El factor de seguridad mínimo para diseño fue de 2.0

Análisis del revestimiento. Con el programa de elementos finitos se obtuvieron los elementos mecánicos y se estimaron las deformaciones en el subsuelo y los asentamientos en la superficie. Para verificar las dimensiones de los túneles y el avance máximo de excavación sin soporte, se estudiaron todas las secciones representativas a lo largo de los ejes conforme a la secuencia estratigráfica y propiedades mecánicas de las tobas, las coberturas entre la clave y la superficie del terreno, las condiciones del frente de excavación, la cimentación temporal de la bóveda y el revestimiento ovoide completo. En la **Fig. 5** se presenta la malla de elementos finitos y los resultados de deformaciones obtenidos para una sección bajo la Unidad de Hexafluoruros.

Predicción de deformaciones. Los asentamientos previstos conforme al análisis con elementos finitos para avances de 1.5 m fueron de 20 a 28 mm, mientras los valores para las convergencias fueron de 13 a 19 mm.

PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO

Los análisis permitieron racionalizar el siguiente procedimiento constructivo:

Acceso a los túneles. Se excavaron los portales y se conformó la trabe de borde reforzada con concreto lanzado y anclas; los taludes laterales se estabilizaron con concreto lanzado y anclas.

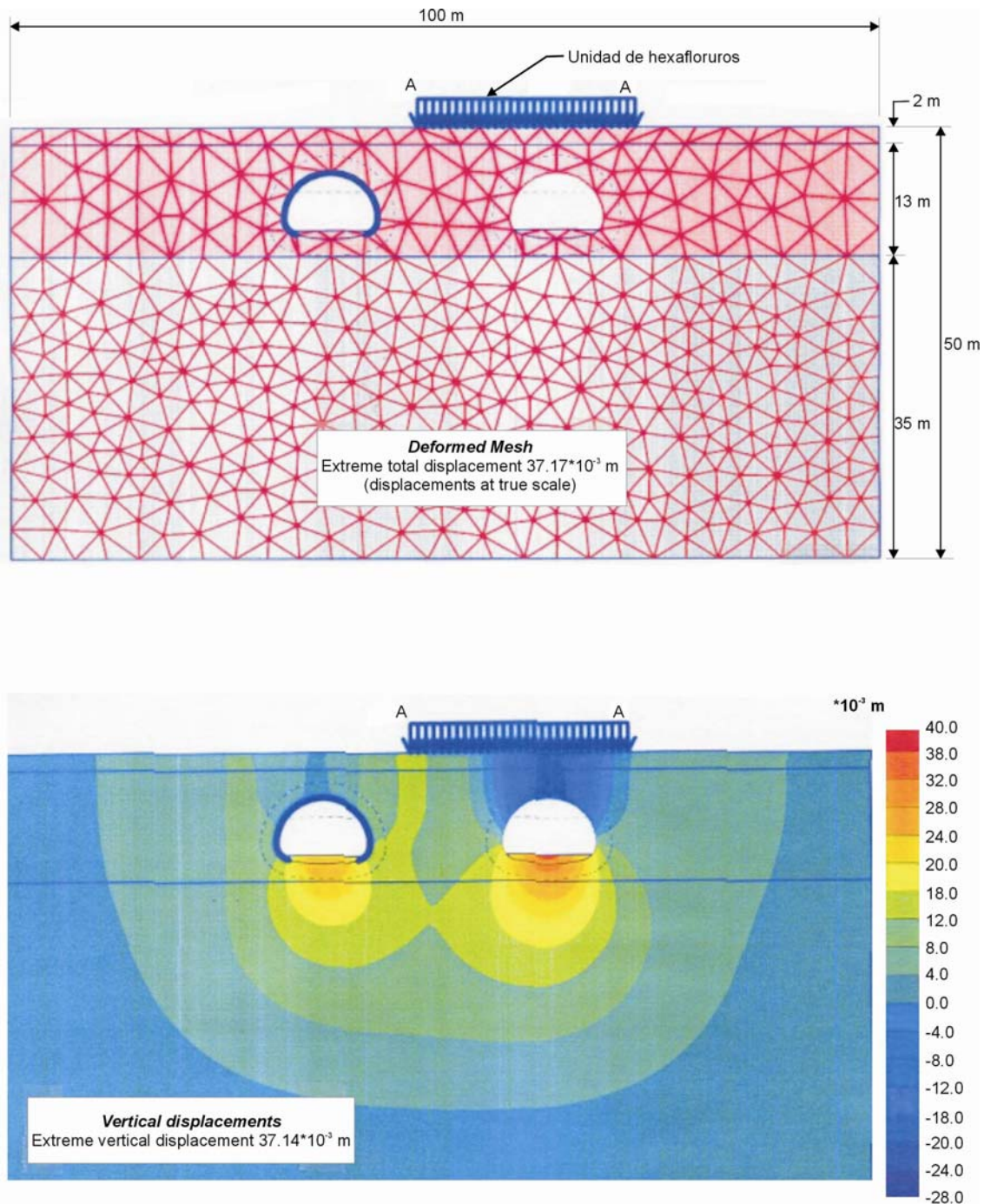


Fig. 5 Modelo de elementos finitos

Ciclo de construcción. Para cada túnel se abrieron dos túneles piloto en los que se conformaron las zapatas de apoyo temporal; en cada avance del túnel se dejó un prisma de toba a manera como banco central, a manera de contrafuerte estructural y se lanzó una primera capa de concreto de 5 cm de espesor, **Fig. 6**. Antes del avance consecuente se engrosó el concreto de la bóveda; el ciclo continuó con avances variables y recubrimientos de concreto lanzado con fibra metálica, hasta completar el revestimiento definitivo de 25 cm de espesor en todo el interior de los túneles.



Fig. 6 Excavación del frente del túnel.

Observe: Los túneles piloto, el prisma central y el revestimiento de concreto lanzado

Los dos túneles piloto se excavan en una longitud de hasta 3.5 m, mismos que una vez terminados se protegieron en todo su contorno interior con una capa de concreto lanzado de 3 cm de espesor. Los avances de excavación de los túneles fueron variables, de 0.6 a 1.5 m, en función de las condiciones estratigráficas definidas con la etapa de exploración y verificadas durante la construcción con observación detallada de los materiales y de la medición de las deformaciones.

Control de la excavación. Durante la excavación, de manera casi continua, se confirmó la estabilidad de diseño del túnel, en función de la longitud de los avances y de la resistencia al esfuerzo cortante de los suelos del frente de los túneles.

Revestimiento estructural. El concreto lanzado aplicado está reforzado con fibra de acero, se colocó en tres etapas: la primera de 5 cm sella y proporciona la

estabilidad inicial; la segunda que completa 15 cm de espesor y la última para llegar a los 25 cm de espesor de diseño. En las zapatas de apoyo temporal de las bóvedas se recurrió a acero estructural y concreto lanzado; para la cubeta del túnel se recurrió a concreto hidráulico reforzado con acero estructural.

Construcción de la cubeta. Por último, se excavó, armó y colocó el concreto de la cubeta en tramos de 12.0 m de longitud y se rellenó con suelo compactado para conformar la superficie de rodamiento, **Fig. 7**.



Fig. 7 Excavación y armado de la cubeta del túnel

Restricción constructiva. Las restricciones de movimiento de la Subestación Eléctrica hicieron necesario hacer dos modificaciones al proceso constructivo: los avances máximos de excavación a se bajaron a 50 cm y los tramos de construcción de la cubeta se redujeron a 6 m de longitud.

Drenes de alivio. Durante la construcción se colocaron drenes provisionales en los sitios donde se detectaron humedades; una vez terminado el revestimiento se completó una red de drenes definitiva, para asegurarse que en ningún sector se acumulará agua. El flujo de esos drenes se canalizará mediante ductos al sistema de drenaje pluvial del propio túnel.

CONTROL DURANTE LA CONSTRUCCIÓN

Instrumentación. Para observar el comportamiento de los túneles se instalaron de manera exhaustiva diferentes tipos referencias topográficas: como testigos superficiales de asentamientos, armellas de referencia de convergencias; y placas para mediciones de distorsión angular de estructuras. Las mediciones durante la construcción se realizaron dos veces por semana y fueron diarias en las partes más sensibles.

Líneas de Colimación Superficial. Fueron perpendiculares al eje de los túneles y se colocaron a cada 10 m; los puntos de nivelación en cada línea se instalaron con separaciones constantes, llegando hasta 21 m a cada lado de los ejes. Los puntos de nivelación ubicados en patios y en vialidades fueron estacas y varillas enterradas en terreno natural; en la losa de la Unidad de Hexafluoruros se colocaron pernos de acero a separaciones de 1.5 a 2.0 m. El equipo topográfico para la medición de los asentamientos fue un Wild NA2 capaz de detectar cambios de ± 0.7 mm/1 km.

Secciones de Convergencia. Estas mediciones indicaban los cambios en longitud que se manifestaron entre pares de puntos fijos instalados en la superficie interna de los túneles antes o inmediatamente después del revestimiento primario y durante toda la construcción; las secciones en que se midieron las convergencias se ubicaron a cada 10 m de separación con cinco puntos de medición localizados: uno en la clave y los cuatro restantes en las paredes. El equipo para medición de convergencias fue un extensómetro de tensión marca Geokon de ± 0.1 mm de precisión.

Clinómetro. Mediante este aparato cuya celda sensible es un servoacelerómetro, se determinaron las distorsiones angulares y por ende cambios con respecto a la vertical en puntos ubicados en todos los módulos de la Unidad de Hexafluoruros; para ello se marcaron 18 puntos en un elemento horizontal de acero y se midieron cambios en las inclinaciones en las direcciones N-S y E-W.

Distorsiones y deformaciones máximas tolerables. Para definir la magnitud de los hundimientos diferenciales y los giros implícitos o distorsión angular, tolerables para los equipos de la Subestación y en especial para la Unidad de Hexafluoruros, se recopiló información de la literatura técnica y se solicitó a la Compañía de Luz y Fuerza del Centro (CLyF) que consultara con el proveedor de los equipos. En las reuniones técnicas con los ingenieros y asesores de la CLyF se convino que los asentamientos para los equipos de la Subestación estuvieran enmarcados en los valores de la distorsión angular de la **tabla 2**. Se convino también que habría tres brigadas de topografía para hacer mediciones cada día y que dependiendo de los valores medidos se definieran tres avisos técnicos:

Admisible. Significa que los asentamientos permitían continuar con la excavación y estabilización de los túneles.

Emergencia. Se debían instalar arcos de refuerzo estructural como requisito para continuar con los trabajos y disminuir la velocidad de penetración de los túneles, hasta demostrar que los hundimientos se habían reducido a valores admisibles.

Inadmisible. Cuando las deformaciones ponían en riesgo la funcionalidad de la Subestación y por ello los trabajos en los túneles deberían de inmediato ser suspendidos y proceder a estudiar y proponer un procedimiento constructivo más conservador.

Tabla 2. Criterios de comportamiento de los túneles

Distorsión angular	Criterio de interpretación y acción en el proceso de construcción de los túneles	Inclinación en grados	Deformación en 20 m (Hexafloruros)
1/1000	Admisible. Se continúa la construcción	5.7×10^{-2}	20 mm (2.0 cm)
1/500	Emergencia. Se instalarán arcos estructurales	1.14×10^{-1}	40 mm (4.0 cm)
1/100	Inadmisible. Se suspende la construcción	5.7×10^{-1}	200 mm (20.0 cm)

COMPORTAMIENTO OBSERVADO DE LOS TÚNELES

Resultados de las nivelaciones topográficas. En las **Figs. 8 y 9** se muestra la sección más ilustrativa de los asentamientos en los patios de la Subestación Eléctrica y otra correspondiente a la Unidad de Hexafloruros; en ellas se advierte que en los 18.0 m de largo de esa instalación (casi perpendicular al eje del túnel 10) la construcción del túnel provocó asentamientos de entre 6 y 8 mm, estos valores implican un diferencial de 2 mm. Es importante señalar que la magnitud de estos asentamientos es la mitad de la pronosticada a consecuencia de la reducción de la longitud de avance considerada en el proyecto.

Los asentamientos máximos ocurridos en la superficie en las líneas de colimación ubicadas en los patios de la Compañía de Luz y Fuerza, en el interior del Depósito de Refrescos y las vialidades, variaron entre 6 y 8 mm; se midieron algunos puntos atípicos con valores de 10 y 11 mm en el patio del estacionamiento de la Compañía de Luz y Fuerza, que se atribuyeron a alteraciones física de los puntos de medición.

Estos asentamientos se pueden expresar como la relación del asentamiento diferencial a la longitud de la Unidad de Hexafloruros como 2/18000 (1/9000). También se puede definir como la relación de asentamiento diferencia total con el entorno como 8/18000 (1/2250). Estos valores demuestran que el hundimiento diferencial inducido queda por debajo de los valores admisibles de la Tabla 1. Por su parte las distorsiones angulares medidas con clinómetro proporcionaron valores similares. En cuanto a las deformaciones de convergencia determinadas con cinta de acero dieron valores de deformación muy reducidos entre 1 y 3 mm.

Mediciones a largo plazo. Las mediciones de hundimientos en las referencias superficiales continuarán durante dos años, para verificar que se mantenga el buen comportamiento del túnel.

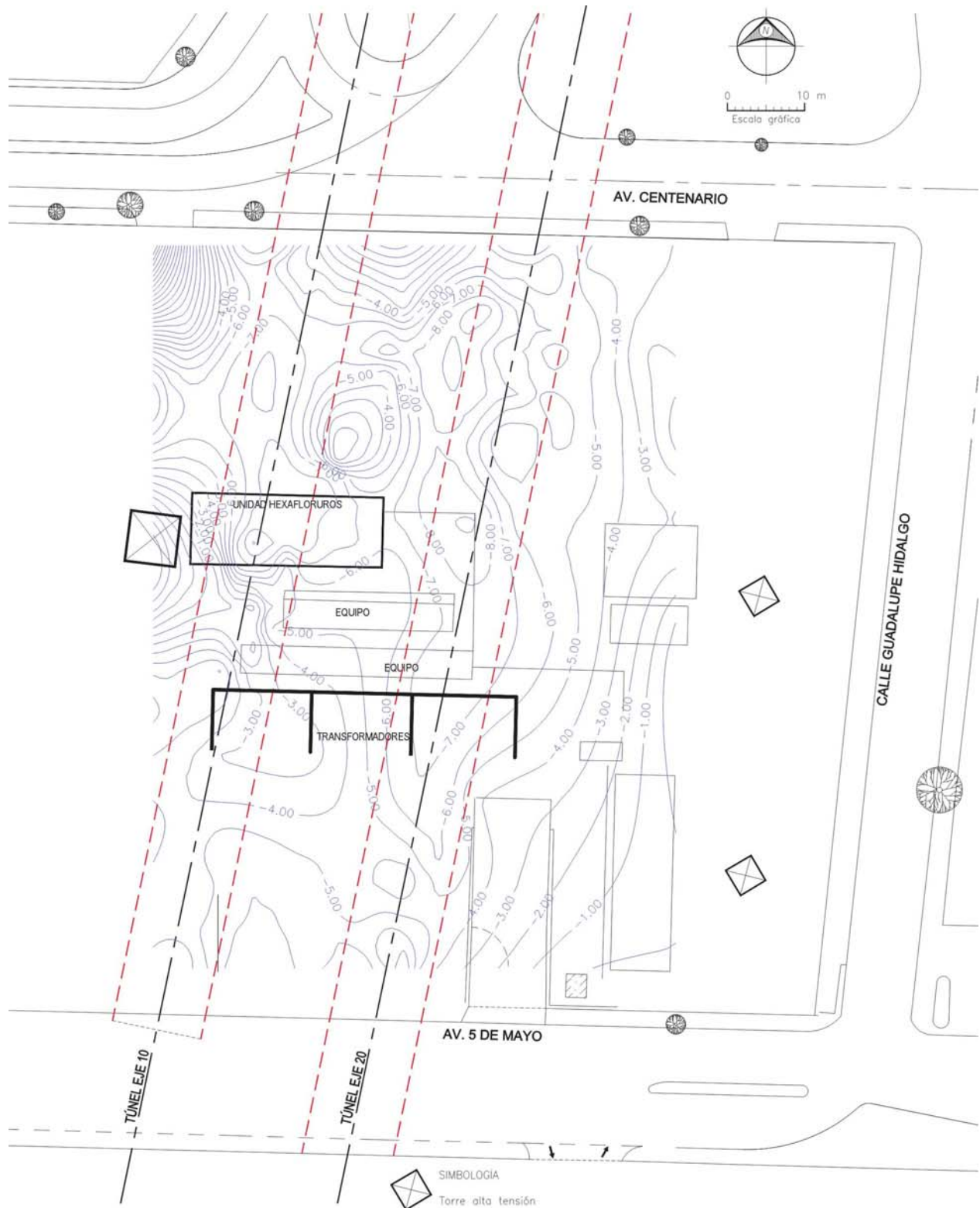


Fig. 8 Configuración de asentamientos en mm. (01-Marzo-2005)

MANTENIMIENTO A LARGO PLAZO

Los túneles del Eje 5 Poniente deberán ser vigilados a lo largo de los años, será necesario realizar dos nivelaciones al año y revisar que los drenes estén funcionando, en caso necesario se deberán limpiar y si en alguno de ellos sale polvo o arena, de deberá instalar un filtro capaz de retener esos materiales finos.

COMENTARIOS FINALES

El diseño y proceso de construcción de los túneles del Eje 5 Poniente han demostrado ser adecuados para llevar a cabo esta obra en las tobas del poniente de la ciudad. El comportamiento de los túneles es satisfactorio, porque los hundimientos que indujo a las instalaciones más sensibles de la Compañía de Luz y Fuerza están por debajo de los hundimientos diferenciales tolerables para esa instalación e incluso fueron de la mitad de los proyectados a consecuencia de disminuir la longitud de los avances.

Estos túneles viales se construyeron a semejanza de otros muchos, incluso en países europeos, estabilizando con concreto lanzado reforzado con fibras de acero, porque se simplifica la construcción y la corrosión de las fibras es menor que en el acero convencional por la discontinuidad de los elementos.

Esta experiencia en los túneles del Eje 5 Poniente podrá servir de estímulo en la construcción de túneles viales para descongestionar la compleja zona poniente de la ciudad de México y otras ciudades de nuestro país.

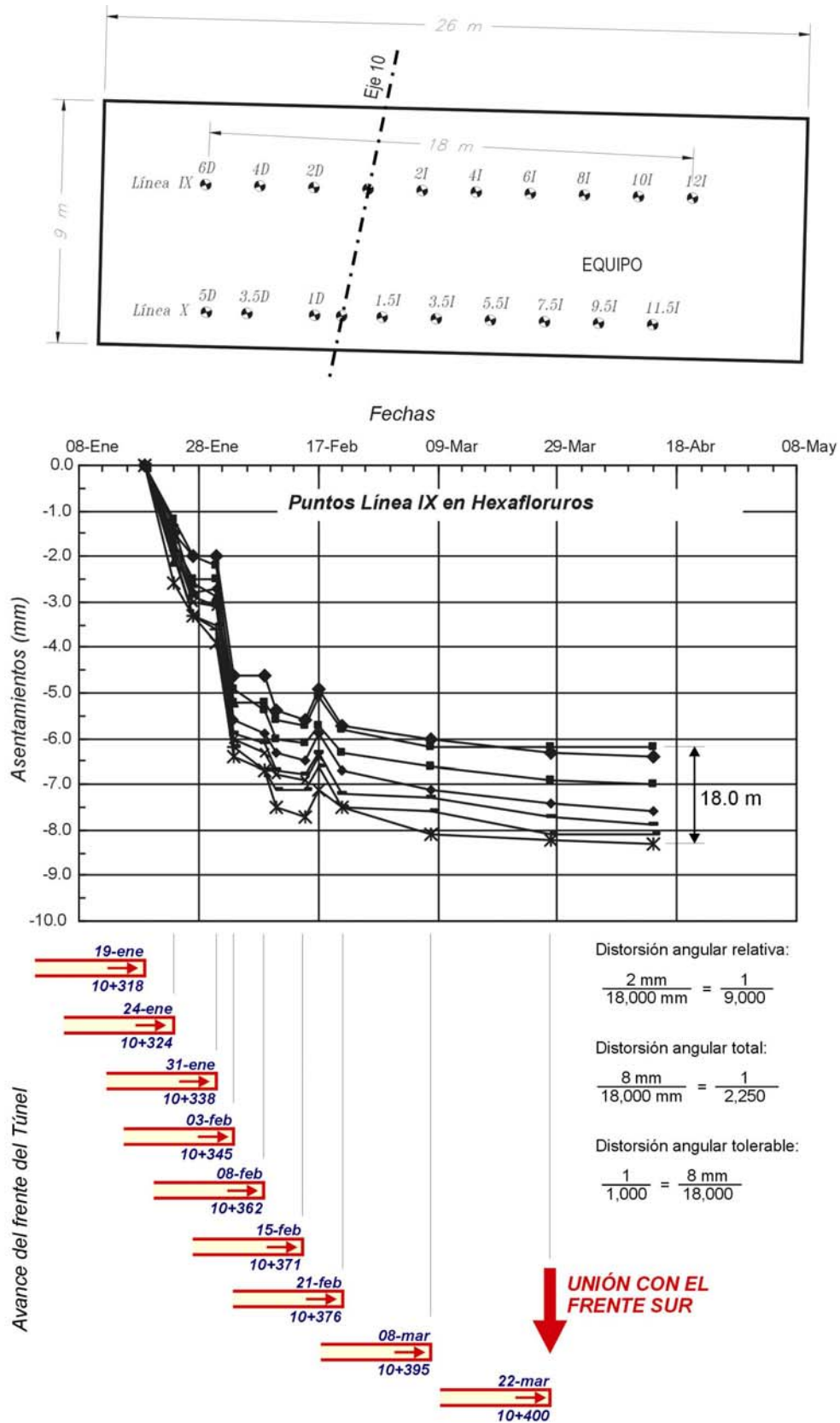


Fig. 9 Comportamiento de los asentamientos en la Unidad de Hexafluoruros