



TUNEL CANAL GENERAL: Obra subterránea en condiciones geotécnicas difíciles

M.I. Mario A. Aguilar Téllez. Gerente de Ingeniería, ICA. mario.aguilar@ica.mx

Dr. Rafael B. Carmona Paredes. Gerente de Ingeniería, CONAGUA. rafael.carmona@conagua.gob.mx

Ing. Pedro Luis Barrera. Gerente de Construcción, ICA. Pedro.barrera@ica.mx

RESUMEN: El Túnel Canal General (TCG) se ubicará en el lago de Chalco, entre los volcanes Xico y La Caldera. El TCG con 5 m de diámetro interno y aproximadamente 7.9 km de longitud, seguirá un trazo paralelo al canal del mismo nombre y será capaz de desalojar hasta 20m³/s. El proyecto considera la construcción de 4 lumbreras, 12 m de diámetro terminado, con una profundidad promedio de 20 m. Para la excavación del túnel se utilizará un escudo mecanizado del tipo EPB, el cual permitirá colocar el revestimiento primario y, la construcción del revestimiento secundario será colado “in situ”. Se estima que tanto las lumbreras como el túnel se excavarán en un depósito de arcilla típica del Valle de México; con contenidos de agua superiores a 300%, baja resistencia al corte y alta compresibilidad; registrándose intercalaciones de estratos arenosos. En este documento se presenta un panorama de las condiciones geotécnicas que se estiman encontrar durante la construcción del TCG bajo condiciones difíciles de suelos.

ABSTRAC: The Tunel Canal General (TCG) will be located near from lake Chalco, between Xico and La Caldera volcanoes. The TCG with 5 m internal diameter and approximately 7.9 km in length, will follow a line parallel to the channel of the same name and will be able to leave until 20m³/s. The project includes the construction of 4 shafts, 12 m of finished diameter, with an average depth of 20 m. A mechanized shield of the EPB will be used for the excavation. The primary lining is constructed for concret segments prefabricated and the construction of the secondary lining will be cast “in situ”. It is estimated that : shaft and the tunnel is will excavated in a deposit of clay typical of the Valley of Mexico; with water contents greater than 300, low resistance and high compressibility. This document presents an overview of the geotechnical conditions estimated report during the construction of the TCG under difficult soil conditions.

1 ANTECEDENTES

El Gobierno del Federal a través de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), proyectó la construcción de la obra denominada “Túnel Canal General (TCG) y sus Captaciones, Cobertura Regional”, la cual se ubicará en la vecindad del lago de Chalco, entre los volcanes Xico y La Caldera. El TCG con 5 m de diámetro interno y aproximadamente 7.9 km de longitud (Fig. 1), sigue un trazo paralelo al canal de mismo nombre y será capaz de desalojar hasta 20 m³/s. Se inicia en la Planta de Bombeo “Parada del Toro”, ubicada en la carretera Tláhuac-Chalco, donde se ha proyectado construir la primera lumbrera (L1) y seguirá en dirección sensiblemente norte, hasta conectarse con la Lumbrera 3A del Túnel (sifón) Río de La Compañía, que como se sabe tiene una Planta de Bombeo denominada La Caldera, donde las aguas son nuevamente elevadas y descargadas de manera superficial a la prolongación norte de su cauce. Para construir el TGC se requerirán 4 lumbreras de acceso, de 12m de diámetro interior y con una profundidad del orden de 20 m. El proceso constructivo de las lumbreras será mediante el procedimiento del muro Milán.

Figura 1. Localización del Túnel Canal General (TCG)

Para la excavación del túnel se utilizará un escudo mecanizado del tipo EPB (*Earth Pressure Balance*), el cual permite realizar la excavación del túnel y de manera paralela colocar el soporte inicial mediante segmentos de concreto prefabricados, conocidos como “dovelas”, que formarán anillos de cinco piezas más cuña, de 25 cm de espesor y 150 cm de ancho. El revestimiento definitivo de 30 cm de espesor, será de concreto armado, colado en sitio.

2 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LAS CONDICIONES GEOTÉCNICAS

El Valle de Chalco se encuentra ubicado entre la Sierra de Chichinautzin y la Sierra de Santa Catarina, se estima que la capa compresible del Valle de Chalco es de 300 metros de profundidad, en la cual se han registrado velocidades de hundimiento entre 30 y 40 cms por año, (Ref . 01).

Figura 2. Planta geológica Túnel Canal General. Carta geológica INEGI. 1:50000.

De acuerdo a la información y referencias técnicas disponibles del área de trabajo, se estima que la excavación del túnel se desarrollará en un 90% en suelos lacustres, conformados por arcillas de alta plasticidad, baja resistencia al corte y alta compresibilidad; registrándose contenidos de agua promedio entre de 350-400%. El tramo restante del túnel se excavará en un material de transición conformado por arcillas de alta plasticidad, arcillas limosas, limos arenosos y material piroclástico producto de la sierra de Santa Catarina, registrándose contenidos de agua entre 50 y 100%. Ver figura 3.

Figura 3. Corte estratigráfico del Túnel Canal General

El perfil estratigráfico tipo de la zona de excavación de las lumbreras y túnel, se compone principalmente por un depósito de arcilla de alta plasticidad con intercalaciones de cenizas volcánicas; las principales características del depósito son:

Arcilla de alta plasticidad y consistencia muy blanda, CH	Contenido de agua, w%, 333 Cohesión, c, 1.35 t/m ² Ángulo de fricción interna, ϕ , 0° Peso volumétrico, γ , 1.29 t/m ³ Modulo de elasticidad, E, 226 t/m ²
---	---

Cercano al sitio de la construcción de la lumbrera L1, se ubica la Planta de bombeo denominada “Parada del Toro”; en este sitio en el año 2010 se instaló el banco de nivel número 7, BN-7; donde se registró una elevación de 2,229.73. En el año 2014, se tomó el registro del mismo banco de nivel, referenciando el dato con un banco de nivel fijo ubicado en el Cerro de Tlapacoya, para dicha fecha el registro fue de 2,228.7115; resultando una diferencia de 1.01875m en un período de cuatro años, es decir, 0.2546m por año. El dato de hundimiento regional señalado es relevante, tomando en cuenta, que el dato obtenido es menor con respecto a los valores referenciales que se tienen de la zona. Para el diseño geotécnico-estructural de lumbreras y revestimiento de túnel; el dato de hundimiento regional es de suma importancia, ya que incide directamente en la estructuración final del elemento.

3 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LAS CONDICIONES PIEZOMÉTRICAS

Para la definición de las condiciones piezométricas del sitio de construcción de las lumbreras y túnel, se revisó la información técnica obtenida en el año 2010, comparándola con los registros piezométricos obtenidos en el 2014. La posición del Nivel de agua freática (NAF), a lo largo del desarrollo del túnel fluctúa entre 1.40 y 2m

de profundidad, tomando como referencia el nivel de brocal de cada uno de los piezómetros instalados. Como se observa en la figura 4, comparando la información piezométrica disponible registrada en el 2010 contra la información obtenida en el 2014, se observa que en el período de cuatro años, no existen cambios en el comportamiento piezométrico, es decir, no se observa abatimiento en la zona de excavación y construcción de las lumbreras; por lo menos en los primeros 40m de profundidad.

Figura 4. Comparativa del comportamiento piezométrico en los sitios de las lumbreras: 2010 vs 2014

Como parte de los trabajos de ingeniería, se revisó la información disponible de la batería de pozos de bombeo profundo “Ramal Mixquix- Santa Catarina” el cual se encuentra aproximadamente a una distancia de 1km con respecto al trazo del túnel. Los datos de perforación de los pozos profundos registraron que las unidades litológicas atravesadas durante la perforación de los mismos, consistieron en su parte superior de una alternancia de sedimentos arcillosos limosos, ceniza volcánica y lentes o pequeños estratos de arena muy fina con presencia de limo y/o arcillas. Subyaciendo a lo anterior se encontraron derrames basálticos en parte fracturada con un espesor variable de 30 a 40 m y, debajo de estos depósitos de material piroclástico, constituidos por tobas arenosas, arenas y cenizas volcánicas con presencia de material arcilloso. Con base a la estratigrafía reportada, el diseño de los pozos consideró aislar la parte superior, los primeros 100 m de profundidad, con un contrademe sanitario y ademado con tubería lisa de diámetros variables y, a partir de los 100m de profundidad se utilizó ademe ranurado tipo canastilla con el objetivo de poder aprovechar el acuífero profundo determinado en las rocas basálticas fracturadas, así como en las unidades litológicas compuestas por piroclastos. También cabe indicar que los niveles dinámicos de bombeo en los pozos varían de 65 a 127 m dichos datos fueron obtenidos de aforos realizados en los años 1997 a 2005. Las capacidades específicas varían del orden de 0.98 a 6.03 lps/m.

En resumen, tomando como referencia la información geotécnica disponible y los datos piezométricos disponibles de la zona de construcción, se puede establecer que el hundimiento puede deberse por el efecto de bombeo profundo de las capas inferiores, y la aportación del hundimiento regional en las capas arcillosas superiores es mínima.

4 ANÁLISIS GEOTÉCNICO DE LAS LUMBRERAS

Para realizar los análisis de estabilidad de las lumbreras, con la información obtenida de los sondeos, realizados en cada sitio de las lumbreras, se realizó el modelo

geotécnico de análisis. En la Tabla 1, se muestra a manera de ejemplo el modelo geotécnico de la lumbrera L1.

Tabla 1. Modelo geotécnico de la lumbrera L1

UNIDAD	DESCRIPCIÓN	Desde	Hasta	γ (t/m ³)	γ_{sat} (t/m ³)	ν	c (k)	ϕ (k)	K_0	σ_v (t/m ²)	τ (t/m ²)	m_v (cm ² /kg)	
A	Costra superficial formada por rellenos heterogéneos.	0.0	3.5	1.60	7.14	0	0.80	0.6	7.14	928.57	-	-	0.45
B	Capa de arcilla de baja resistencia al corte y alta compresibilidad	3.5	6.0	1.10	1.27	0	0.80	0.6	1.27	178.00	0.0564	-	0.45
C	Capa de arcilla de baja resistencia al corte y alta compresibilidad	6.0	8.5	1.17	1.88	0	0.80	0.6	1.88	178.00	0.1732	-	0.45
D	Dos trazadores de ceniza volcánica, de espesores de 0.35m y 0.4m con un estrato intermedio de arcilla de baja resistencia	8.5	9.6	1.60	9.38	0	0.80	0.6	9.38	1725.00	-	-	0.45
E	Capa de arcilla de baja resistencia al corte y alta compresibilidad. Contenido de agua >300%	9.6	19.7	1.18	2.62	0	0.80	0.6	2.62	209.23	0.2065	-	0.45
F	Capa de arena limosa /materiales cementados	19.7	22.0	1.33	8.98	0	0.80	0.6	8.98	1652.24	-	-	0.45
G	Capa de Arcilla. Baja resistencia al corte y alta compresibilidad. Contenido de agua >300%	22.0	24.2	1.20	2.85	0	0.80	0.6	2.85	308.00	0.1700	-	0.45
H	Capa de arena/materiales cementados	24.2	24.7	1.60	9.33	0	0.80	0.6	9.33	1717.33	-	-	0.45
I	Capa de arcilla de baja resistencia al corte y alta compresibilidad. Contenido de agua >300%	24.7	32.0	1.26	4.04	0	0.80	0.6	4.04	520.00	0.1588	-	0.45
J	capa de arena/materiales cementados	32.0	32.3	1.50	19.20	0	0.80	0.6	19.20	3532.80	-	-	0.45
K	Capa de arcilla de baja resistencia al corte y alta compresibilidad. Contenido de agua >300%	32.3	39.2	1.20	5.12	0	0.80	0.6	5.12	583.00	0.1342	-	0.45
L	Capa de arena/materiales cementados	39.2	39.6	1.50	9.38	0	0.80	0.6	9.38	1725.00	-	-	0.45
M	Capa de arcilla de baja resistencia al corte y alta compresibilidad. Contenido de agua >300%	39.6	46.0	1.20	5.65	0	0.80	0.6	5.65	820.00	0.1500*	-	0.45
N	capa de arena/materiales cementados	46.0	46.2	1.60	19.20	0	0.80	0.6	19.20	3532.80	-	-	0.45
O	Capa de arcilla de baja resistencia al corte y alta compresibilidad. Contenido de agua >300%	46.2	46.5	1.20	5.85	0	0.80	0.6	5.85	850.00	0.1500*	-	0.45

Con dicha información se realizaron las revisiones de estabilidad, tomando como referencia que el procedimiento a emplear es muro Milán. Las principales revisiones de estabilidad realizadas fueron: falla de fondo, falla por subpresión, estabilidad de la zanja para alojar el muro Milán, revisión por flotación, etc; en este documento se presentan los resultados obtenidos del análisis de la estabilidad de la zanja para alojar el muro Milán, tomando como caso de ejemplo la lumbrera L1. A partir de los parámetros definidos en la Tabla 1; se realizó un análisis del proceso constructivo del muro Milán, utilizando el método de elemento finito (PLAXIS 2D). Debido a la baja resistencia al corte de las arcillas, y al prefabricamiento que se estima tiene el depósito de arcillas; para mitigar el problema de pérdida de lodos o concreto durante la etapa de construcción de muros Milán, se planteó como medida de mitigación al efecto de fracturamiento hidráulico, la construcción previa de una pantalla impermeable que permitiera aislar el núcleo de la lumbrera durante la construcción de los tableros. Los casos de analizados fueron:

- ANÁLISIS A: Construcción de muro Milán sin considerar la construcción previa de pantallas perimetrales impermeables.
- ANÁLISIS B. Construcción de muro Milán considerando la construcción previa de dos pantallas perimetrales (exterior e interior).
- ANÁLISIS B: Construcción de Muro Milán considerando la construcción previa de una pantalla perimetral (exterior).

Derivado de los análisis indicados se obtuvo la figura 5, donde se resumen los resultados de los análisis realizados.

Figura 5. Análisis teórico de la estabilidad de la zanja para alojar el muro Milán.

Como se observa en la figura anterior, la construcción previa de una o dos pantallas perimetrales impermeables, permiten mejorar el comportamiento deformacional del proceso de construcción del muro Milán; tomando como referencia las condiciones geotécnicas que se reportan en el sitio de la lumbrera L1; que debido a la baja resistencia y alta compresibilidad, la construcción de los muros Milán, activa un cambio en el estado de esfuerzos del suelo, traduciéndose en la activación de fisuras pre-existentes, alta deformabilidad del depósito y pérdidas de fluido estabilizador.

5 ANÁLISIS GEOTÉCNICO DEL TÚNEL

Para el análisis de interacción suelo-estructura del revestimiento primario conformado por dovelas, se utilizó el método de elemento finito (PLAXIS 2D); considerando un comportamiento del suelo en condiciones no-drenadas aplicando el Método B, donde se consideró:

- parámetros de resistencia del suelo en condiciones de esfuerzos totales y,
- parámetros de rigidez en condiciones drenadas.

Los principales objetivos del análisis realizado con ayuda del elemento finito, fue determinar las deformaciones y estado de esfuerzos actuantes en el anillo de dovelas para la definición de los elementos mecánicos y, diseño estructural del elemento. Con el fin de considerar la flexibilidad del anillo de dovelas, en el modelo de análisis se consideró una reducción del módulo de Elasticidad del concreto, variando dicho valor entre 10 y 25%, esto considerando la referencia :Ref. (02). Paul et al. 1982.

Las principales hipótesis del modelo de análisis indicado son:

- 1) La colocación del revestimiento se efectúa simultáneamente con la excavación. Esta hipótesis representa adecuadamente las condiciones constructivas cuando el túnel se excava con un escudo y, el revestimiento está formado por dovelas prefabricadas.
- 2) El problema analizado se considera bidimensional, de profundidad infinita, por lo que no se consideran condiciones transitorias de esfuerzos en la cercanía del frente.

La selección de las secciones geotécnicas más determinantes para el cálculo estructural del soporte inicial mediante anillos de dovelas (endovelado) se realizó teniendo en cuenta los siguientes parámetros:

- Cobertura de tierras
- Nivel piezométrico actuando a la profundidad del túnel.
- Peso específico de los suelos
- Coeficiente de empuje en reposo (K_0)
- Rigidez del terreno (E)

A continuación se presenta un ejemplo del resumen de los resultados obtenidos en PLAXIS.

Figura 6. Resumen de los resultados obtenidos en el análisis de elemento finito, de la sección de la lumbrera L1

6 CONCLUSIONES

- a) La construcción de las lumbreras y la excavación del túnel, se realizará en condiciones de suelos blandos saturados: Arcillas de alta plasticidad de baja resistencia al corte y alta compresibilidad.
- b) En un período de 4 años, el registró piezométrico en los sitios de las lumbreras, indica que no existe abatimiento en la zona de construcción. Esto se puede deber a la posible comunicación de los estratos arenosos con el canal, a través de las microfisuras del estrato arcilloso.
- c) A partir de los resultados obtenidos en el análisis de estabilidad de la zanja para alojar el muro Milán de las lumbreras, se observa una clara influencia favorecedora de las pantallas de lodo fraguante al proceso de construcción de los muros; principalmente, porque permiten disminuir los desplazamientos horizontales inducidos por el colado del muro; ya que sin la construcción previa de la pantallas, se observan desplazamientos teóricos del orden de 2 cm en dirección externa al muro Milán; y con la construcción de las pantallas los desplazamientos se reducen a 6.86mm.
- d) Es importante mencionar que los análisis presentados no modelan los posibles fracturamientos pre-existentes en los estratos arcillosos, debido a que su detección es sumamente complicada aun usando técnicas no invasivas como la geofísica. Dicha condición induce a provocar un fracturamiento hidráulico de la masa del suelo, durante el cambio de esfuerzos provocado por la excavación.
- e) En el caso de la construcción del túnel, será importante llevar un control del proceso de excavación, cuidando los aspectos constructivos como: la inyección de contacto suelo-dovela, tanto la presión por aplicar como el control de volumen por inyectar; esto para asegurar el confinamiento del anillo de dovelas, condición de suma importancia para el comportamiento deformacional del anillo.

REFERENCIAS

- a) Ortega et al. (2007) “ Origen y evolución de un nuevo lago en la planicie de Chalco: implicaciones de peli-

gro por subsidencia e inundación de áreas urbanas en Valle de Chalco”.

- b) Paul et al. (1982). “Design Recommendations for concrete tunnel linings. Vol. I y Vol. II. University of Illinois at Urbana. Champaign Department of Civil Engineering. November, 1983.
- c) Anexo 1 “Términos de Referencia”, Comisión nacional del agua -Coordinación general de proyectos especiales de abastecimiento y saneamiento-Gerencia de ingeniería-Dirección general adjunta de supervisión de obras hidráulicas- Subgerencia de supervisión de obras hidráulicas-Subgerencia de estudios y proyectos, 2 de diciembre 2013.
- d) Trabajos de campo y laboratorio para diseño geotécnico del sitio de la Lumbrera L1 del Túnel Canal General, CONAGUA.
- e) Programa Plaxis 2D, Ver 8.5, desarrollado por Delft University of Technology and Plaxis B.V., The Netherlands (2002)