

Análisis y procedimientos constructivos de lumbreras del Sistema de Drenaje Profundo de la ciudad de México

Dirección General de Construcción y Operación
Hidráulica/Secretaría General de Obras/DDF

El Sistema de Drenaje Profundo está constituido por túneles de diferentes diámetros que desalojan las aguas negras y los altos volúmenes de precipitación pluvial que se generan en el área urbana de la ciudad de México. Para construir y operar estos túneles se requieren accesos verticales o lumbreras, las que son objeto del presente artículo. Se describen los métodos de construcción más utilizados, con énfasis en el método constructivo denominado "lumbrera flotada", y se exponen las consideraciones de diseño, construcción y las innovaciones recientes. También se comentan los resultados de los programas de instrumentación, que por lo general acompañan a este tipo de obras.

A raíz del proceso de industrialización del México actual iniciado en la década de los cuarenta, y por ser el centro económico, político y cultural del país, el Distrito Federal y la zona conurbada tuvieron un crecimiento notable. Por esto, la ciudad demandó, entre otros servicios, el abastecimiento de agua potable para la población, lo que al mismo tiempo redundó en dos problemas simultáneos: la extracción de agua del subsuelo y un incremento en el caudal de aguas negras para su posterior desalojo.

La extracción de aguas implicó el abatimiento de las presiones piezométricas y la consecuente aceleración de la consolidación de las capas compresibles del subsuelo. Esta consolidación fue de tal magnitud que en los años sesenta, en algunos puntos del centro de la ciudad, se habían registrado asentamientos del orden de 8 m, con lo que el nivel del zócalo quedaba 5 m por debajo del nivel del Gran Canal de Desagüe (DDF, 1975). Así, la amenaza de inundaciones catastróficas, peores que las ocurridas a principios de siglo, ponían en riesgo la seguridad de la zona céntrica del Distrito Federal.

Ante circunstancias tan apremiantes, las autoridades del Departamento del Distrito Federal (DDF) a través de la Dirección General de Obras Hidráulicas, antecesora de la DGCOH, determinaron en 1967, proyectar y construir el Sistema de Drenaje Profundo

del Distrito Federal (DDF, 1975). Ocho años después esta magna obra de la ingeniería mexicana entraba en funcionamiento, y a partir de esa época ha experimentado un crecimiento constante hasta hoy día.

El Sistema de Drenaje Profundo está constituido por interceptores profundos y emisores; los diámetros de estos conductos o túneles son de 4.0 a 5.0 m y de 6.5 m, respectivamente. La plantilla de los interceptores se ubica entre los 15 y 40 m, y la plantilla del emisor rebasa siempre los 40 m. En la ilustración 1 se aprecia la distribución actual del sistema.

Durante la fase de proyecto, en función de las longitudes y profundidades de estos túneles, y con el respaldo de estudios técnico-económicos, se diseñaron accesos verticales o lumbreras mediante los cuales fuera posible ejecutar todas las operaciones necesarias para construir los túneles, o para efectuar las captaciones necesarias hacia el drenaje profundo.

El diámetro y profundidad de las lumbreras está regido por el tipo de herramientas que se requieren para la excavación del túnel y por el nivel de plantilla del mismo. Los diámetros efectivos han sido de 6, 9 y 12 m y el fondo de las lumbreras se ha determinado a profundidades de 40 m o menores para el caso de los interceptores, y hasta

de 200 m para el emisor central. Excepcionalmente, se han construido lumbreras de mayor diámetro, cuyo propósito no es ya el de ser un acceso al túnel, sino que obedece a requerimientos hidráulicos como es el caso de las que forman parte de algunas estaciones de bombeo.

Métodos constructivos de lumbreras

El procedimiento para construir una lumbrera depende fundamentalmente de la naturaleza del suelo que la aloje, pero también de los avances y recursos técnicos con los que se cuente. Las lumbreras del sistema de drenaje profundo se han construido en roca, suelos compactos y densos, y en suelos blandos. A partir de estos materiales existen dos tipos de lumbreras: construidas en roca y construidas en suelos.

Construidas en roca

La roca, así como las tobas y conglomerados, se encuentra en la mayoría de las lumbreras del emisor central, el cual se desarrolla desde la zona surponiente del área urbana y termina en el río El Salto en Tula, Hgo.

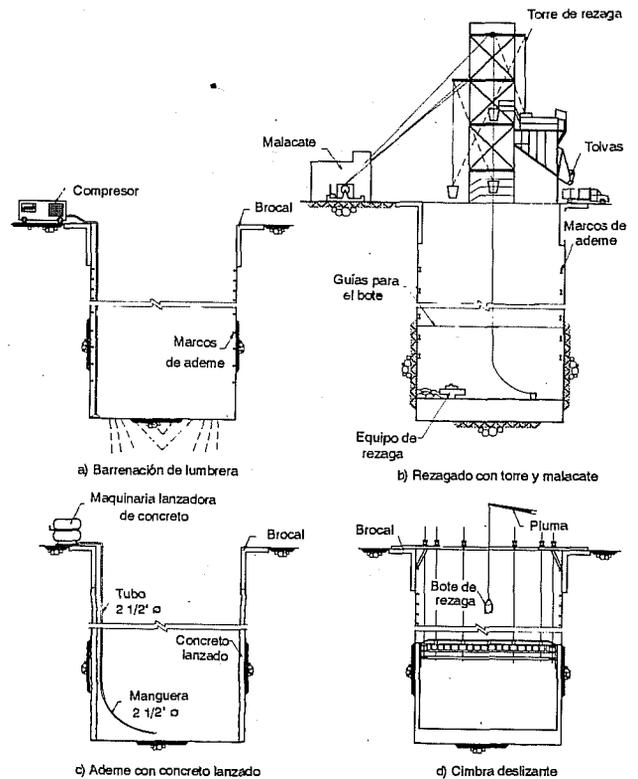
Para excavar tobas y conglomerados no muy compactos se emplean martillos neumáticos, mientras que en estratos muy duros y en roca se usan explosivos. La rezaga provocada por los explosivos y rompedores, normalmente es desalojada por métodos convencionales; el ademe de las paredes de la excavación se realiza mediante marcos de acero con retaque de madera, anclados adecuadamente a la roca, o bien, con concreto lanzado; el revestimiento definitivo se efectúa con cimbra deslizante. En la ilustración 2 se aprecia el procedimiento descrito (Túnel S.A. de C.V., 1976).

Construidas en suelos

Las lumbreras construidas en suelos se dividen en dos clases: las de suelos blandos y las de suelos de consistencia blanda a firme, típicos de zona de transición. A continuación se describen los métodos que mayor uso han tenido en el ámbito local, algunos de los cuales son aportaciones de técnicos mexicanos al campo de la ingeniería.

- *En suelos de transición.* Estos suelos están formados por una sucesión de estratos areno-limosos, arcillo-limosos, arenas y gravas localizados entre la zona de suelos compactos propios de lomeríos y la denominada zona de lago, formada por arcillas de consistencia blanda y muy compresible.

2. Procedimiento constructivo de lumbreras en roca



En la ilustración 3 se reproduce la zonificación geotécnica actualmente propuesta para la ciudad de México, donde puede apreciarse la configuración de cada una, así como la subdivisión de la zona de transición.

- *En zonas de transición alta.* Puesto que los suelos de la zona de transición alta por lo general son de consistencia firme, la falla de fondo no preocupa y las expansiones son mínimas o despreciables. Para estos casos se ha empleado la técnica llamada lumbrera ademada o técnica "túnel" que consiste en lo siguiente: Primero se excava en toda el área de la lumbrera hasta 2.0 m de profundidad y se construye el brocal. A continuación se efectúa la excavación, con martillo neumático, de un espacio suficiente para colocar un anillo de dovelas de concreto, el cual se ancla al suelo circundante. El núcleo central de suelo se retira para nuevamente excavar en la periferia y colocar el siguiente anillo de dovelas. Al terminar la instalación del tercer anillo, se coloca un tapón en el fondo y se efectúa una inyección de lechada de cemento. La colocación de anillos e inyección se repiten cuantas veces sea necesario para alcanzar la profundidad de proyecto. Posteriormente, se procede al colado

de la losa de fondo y del muro de la lumbraera mediante cimbra deslizante. Dada la presencia de mantos colgados en estas zonas, se requiere del auxilio del bombeo de aguas freáticas.

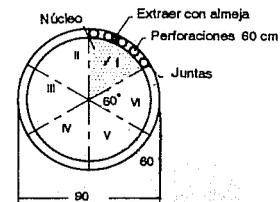
- **En zonas de transición baja.** En los suelos localizados en la zona de transición baja, en los que existen estratos arcillosos blandos de espesores considerables, se utiliza el procedimiento de muros colados en sitio, conocidos como técnica "Solum" que consta de las siguientes etapas:

- Se inicia con la excavación de la zanja anular que alojará el revestimiento de la lumbraera. Esta excavación se efectúa mediante perforaciones de 60 cm de diámetro en cada uno de los seis sectores en que se divide el perímetro anular. Entre una perforación y otra permanecen franjas de suelo que son retiradas mediante almeja guiada. La estabilización de la zanja se logra con lodo bentonítico.
- Alcanzado el nivel de desplante de los muros, se coloca el armado de refuerzo del muro en cada sector y se procede al colado continuo mediante el descenso del concreto hasta el fondo, a través de un tubo "Tremie", cuya punta debe permanecer siempre embebida en el concreto para evitar su contaminación. Puesto que la densidad del concreto es mayor que la del lodo, éste es desplazado a la superficie.
- Una vez colados los muros, se procede a excavar el núcleo hasta la profundidad de proyecto. A partir de cierto nivel, de ser necesario, se deposita agua para evitar expansiones y una eventual falla de fondo. Cuando se ha llegado al nivel de proyecto de la excavación, se cuela un tapón o losa de concreto simple, sobre la que se coloca el acero de refuerzo de la losa estructural, anclada perfectamente al revestimiento de la lumbraera. La secuencia gráfica de este procedimiento se muestra en la ilustración 4.

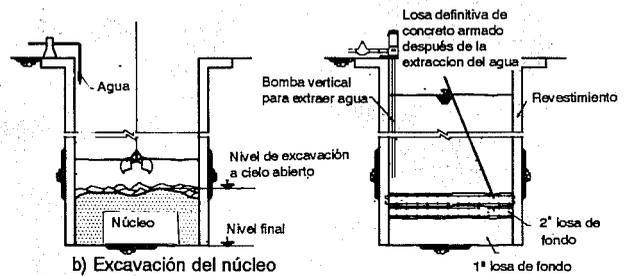
Una variante de este método es la llamada técnica "Soletanche", que se diferencia de la técnica "Solum" en el método de perforación del anillo perimetral en el que se alojará el muro, y en la solución de la junta de colado de cada sector. En la ilustración 5 se aprecia esta técnica.

En ocasiones, debido a la proximidad de la zona de transición baja a la zona de lago, se ha tenido que recurrir a procedimientos constructivos propios de suelos blandos, tales como el denominado método de "lumbraera flotada" que se describe más adelante.

4. Técnica "Solum"



a) Perforaciones en un sector de la zanja anular



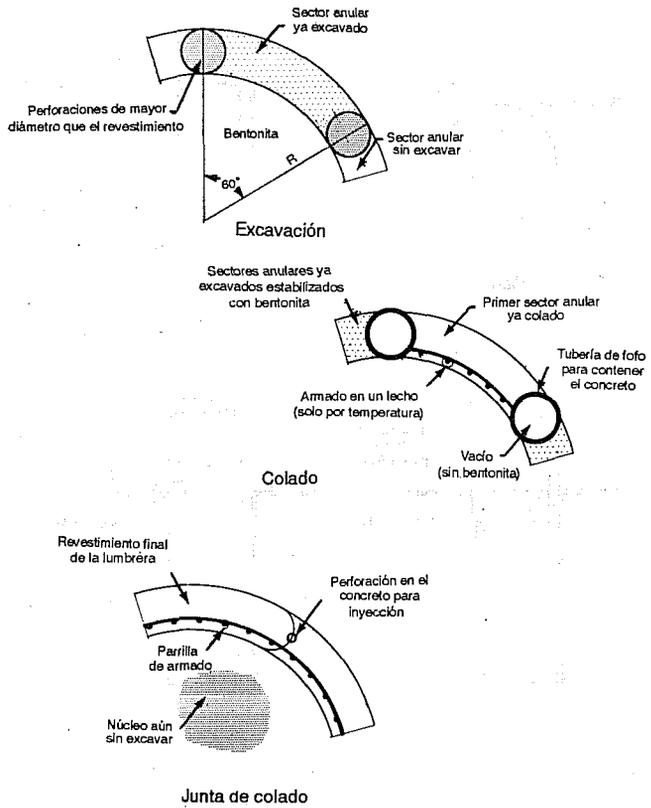
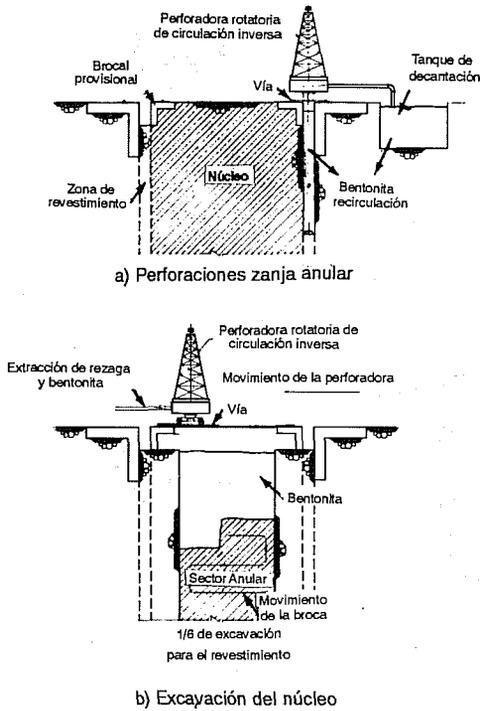
b) Excavación del núcleo

c) Colado de la losa de fondo

- **En suelos blandos.** Al efectuar una excavación de ciertas dimensiones (14.4 m de diámetro por 35.0 m de profundidad) en suelos arcillosos de baja resistencia al corte y en presencia de aguas freáticas, surgen serias dificultades de estabilidad que se agravan en la medida que las variables del suelo se modifican con el tiempo. La empresa mexicana Constructora Estrella, retomando la experiencia para estabilizar pozos profundos y zanjas para muros "milán" mediante lodos bentoníticos, ideó un método constructivo que al tiempo que garantiza la estabilidad del fondo y paredes de la excavación, posibilita la construcción de la losa de fondo y muro de la lumbraera. Este método denominado "lumbraera flotada" (véase ilustración 6), es el de mayor uso en la zona de lago de la ciudad de México (según zonificación geotécnica de la ilustración 3); su procedimiento de construcción consiste en lo siguiente:

- Se construyen dos brocales circulares que servirán de guía para excavar una zanja anular hasta la profundidad de proyecto, por medio de perforadora y almeja guiada. En toda esta etapa el suelo desalojado se sustituye por lodo bentonítico. En seguida se demuele el brocal interior y se retira el núcleo de suelo, sustituyendo siempre el material excavado por lodo bentonítico hasta alcanzar la profundidad requerida. A continuación en la superficie del lodo se deposita un tanque metálico en posición invertida, con diámetro menor al del brocal exterior, quedando así una holgura entre la periferia del tanque y la pared de la excavación

5. Técnica "Soletanche"



a través de la cual se maneja el nivel y cambio de lodos. Este tanque se convierte en el área de trabajo, sobre la que se efectuará el colado de la losa de fondo y el primer tramo de muro de lumbrera. Durante esta etapa, el sistema tanque-lumbrera en construcción se sostiene del brocal mediante viguetas metálicas.

Terminada la primera etapa de colado, se inyecta aire al interior del tanque para provocar su flotación. En ese momento se retiran las viguetas y el sistema queda listo para iniciar lo que se ha llamado primera etapa de inmersión, la cual se realiza al desalojar paulatinamente el aire a presión. El descenso es guiado a través de malacates hasta llegar al nivel requerido para iniciar la segunda etapa de colado; nivel en el que nuevamente el sistema tanque-lumbrera se ancla al brocal.

El ciclo establecido colado-inmersión se repite hasta que se alcanza la profundidad de proyecto, y al final se liga la lumbrera con el brocal mediante traveses de concreto. La holgura o espacio anular entre el muro de la lumbrera y la pared de la excavación, es rellenado con un mortero de suelo-cemento.

Diseño geotécnico

Por el empleo tan frecuente del método de "lumbrera flotada", aquí se hace referencia únicamente a los criterios teóricos que se utilizan para este análisis en particular.

Previamente a cualquier análisis, se revisa que el subsuelo en cuestión cuente con un estrato superficial compacto para poder soportar las maniobras de la maquinaria y que el resto esté constituido básicamente por arcillas, pues un porcentaje elevado de suelos granulares impediría la utilización de este procedimiento. La revisión de la estabilidad de la lumbrera, en sus diferentes etapas, es un factor primordial para lograr la realización fructífera del proyecto.

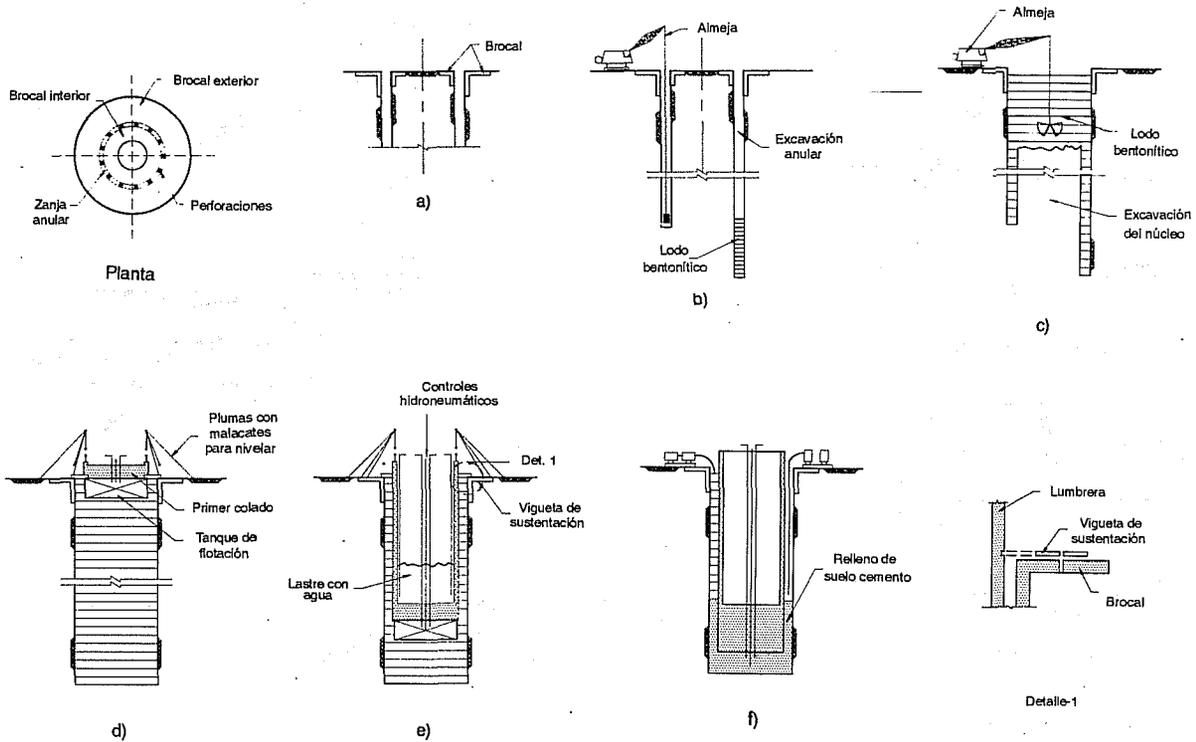
Etapa de excavación

Durante el proceso de excavación, la estabilidad de la masa de suelo se revisa para verificar las condiciones siguientes:

Falla de fondo

En suelos cohesivos de baja resistencia al corte,

6. Procedimiento constructivo de "lumbreira flotada"



cuando se efectúa una excavación, se provoca un desequilibrio de presiones geostáticas entre su fondo que queda liberado de cargas, y el nivel correspondiente del suelo adyacente a la excavación. Como si se tratara de una balanza, la columna del suelo circundante tiende a moverse hacia abajo y el fondo de la excavación hacia arriba. En este mecanismo, la única restricción que ofrece el suelo movilizado, es la cohesión o resistencia al corte a lo largo de la línea potencial de falla. Una fuerza adicional oponente a este mecanismo de falla es la columna de lodo, actuando sobre el fondo de la excavación. La idealización de este mecanismo se muestra en la ilustración 7a. En estas condiciones el factor de seguridad (FS) contra la falla de fondo se establece con la siguiente expresión:

$$FS = \frac{c_2 N_c}{H(\gamma_s - \frac{c_1}{B'}) + q - \gamma_L h_L} \geq 1.5$$

donde:

- c_2 = Cohesión del suelo por debajo del fondo de la excavación.
- N_c = Factor de capacidad de carga que depende de las dimensiones de la excavación.

- H = Profundidad de la excavación.
- γ_s = Peso específico del suelo adyacente y por encima del nivel del fondo de la lumbreira.
- c_1 = Cohesión de la columna superior de suelo.
- B' = Ancho de la franja que se moviliza.
- B = Ancho de la excavación.
- q = Sobrecarga superficial.
- γ_L = Peso específico de lodos.
- h_L = Altura de la columna de lodos.

Puesto que existen distintos valores de cohesión y peso volumétrico a diferentes profundidades, es necesario revisar el factor de seguridad reiterativamente.

Estabilidad de las paredes de la zanja anular

En el momento en que se forma la zanja anular, el suelo localizado a ambos lados de la misma queda sin sustento y tiende a moverse al interior de la excavación. Este desplazamiento es contrarrestado tanto por la presión del lodo como por la resistencia provocada por la cohesión del suelo (véase ilustración 7b). Este problema se expresa analíticamente de la siguiente manera (Xanthakos, 1979):

$$H_{cr} = \frac{fc_1 - 2q}{\gamma_s - \gamma_L} \geq 1.5$$

donde:

- H_{cr} = Altura crítica.
- f = Factor de forma que considera el efecto tridimensional de la masa de suelo.
- c_1 = Cohesión del suelo reducida por el tiempo de exposición.
- q = Sobrecarga superficial.
- γ_s = Peso específico del suelo.
- γ_L = Peso específico del lodo.

El factor de forma varía según el análisis, si se hace para la pared cóncava o convexa de la zanja anular (Xanthakos, 1979). Finalmente, el factor de seguridad se obtiene comparando la altura crítica con respecto a la altura real de la excavación.

Este análisis expresa con claridad el papel relevante que juega la magnitud de la densidad del lodo bentonítico en la estabilidad de la zanja.

Etapa posterior a la excavación

Flotación

Debido a la presencia del nivel freático, en el fondo de la lumbrera actúan fuerzas de subpresión, que pueden provocar una virtual flotación de la lumbrera misma. Dicha subpresión será igual al área de la lumbrera multiplicada por la columna hidrostática. El valor obtenido se compara con el peso total de la estructura, y se obtiene así el factor de seguridad.

$$FS = \frac{W_L}{P_h} \geq 1.1$$

donde:

- W_L = Peso de la lumbrera.
- P_h = Fuerza de la subpresión.

Descarga del subsuelo

Puesto que en general el peso del material excavado es mayor al peso de la lumbrera y estructuras de captación que se alojen en ella, es necesario conocer la magnitud de la descarga que se transmitirá al subsuelo:

$$W_c = W_L - W_S$$

donde:

- W_c = Descarga al subsuelo.
- W_L = Peso de la lumbrera.
- W_S = Peso del suelo excavado.

De acuerdo con la magnitud de la descarga se estudiará la necesidad de optar por medidas adicionales, para evitar deformaciones nocivas en el sistema lumbrera-túnel.

Experiencia actual

La experiencia acumulada en el diseño y construcción de lumbreras ha sido amplia. No obstante, se siguen perfeccionando los métodos gracias a las investigaciones y aportaciones promovidas por los profesionales de la ingeniería y las propias autoridades del DDF. Puesto que una experiencia significativa por su conceptualización y ejecución es la "lumbrera flotada", se describen algunas de las innovaciones más recientes y se exponen al final los resultados de un programa de instrumentación en la construcción de este tipo de lumbreras.

Modificaciones al mejoramiento del suelo y portal de salida en lumbreras flotadas

Cuando se inició el empleo del escudo de frente cerrado con auxilio de lodos a presión para excavar túneles en suelos blandos, el constructor de esta herramienta recomendó mejorar el suelo aledaño a la lumbrera, afectado por el túnel. En la práctica, este mejoramiento consistió en retirar un prisma de suelo de volumen igual a 800 ó 1000 m³ y sustituirlo por un mortero de resistencia similar o ligeramente mayor a la del suelo desalojado. El mejoramiento del suelo para la salida del escudo se reemplazó con base en una adecuación en el portal de salida, consistente en un muro de mortero de resistencia nominal promedio de 30 kg/cm², contenido en el espesor del muro estructural de la lumbrera y rigidizado con un sistema de viguetas para brindar mayor seguridad al muro del portal.

Como el sistema de viguetas implica erogaciones importantes, recientemente se modificó el procedimiento, respetándose sólo el muro de mortero, que ahora se refuerza adosando otro igual de 60 cm de espesor en el espacio de la zona de la zanja anular. El diámetro de este nuevo muro es 2 m mayor al del portal de salida (véase ilustración 8).

Modificación al tanque de flotación

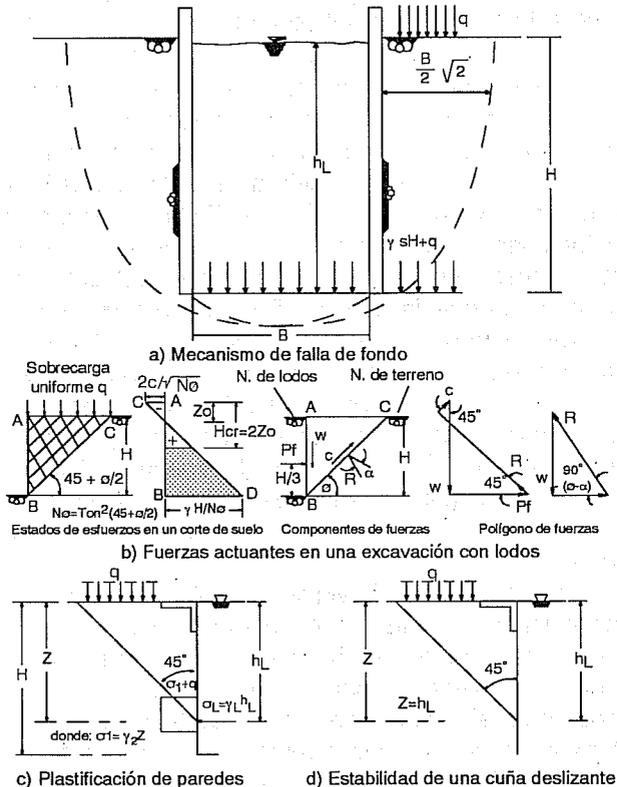
Con anterioridad se describió la función de este tanque, el cual cuenta con un peralte efectivo de 3 m, lo que implica efectuar una sobreexcavación de igual dimensión para alojarlo en el fondo de la lumbrera.

En la actualidad, en algunas lumbreras se ha eliminado este tanque y en su lugar se utiliza un "tanque invertido" que se integra a la losa de fondo, cuyo ascenso o descenso es regulado exclusivamente por el abatimiento o recuperación del nivel de los lodos, con lo que además se elimina la inyección de aire. Este criterio se emplea primordialmente cuando el nivel de lodos pueda abatirse a 2.5 m por debajo del nivel del terreno natural, sin que las paredes de la excavación pierdan su estabilidad. Por otra parte, con esta modificación se ahorran de 2 a 3 m de sobreexcavación.

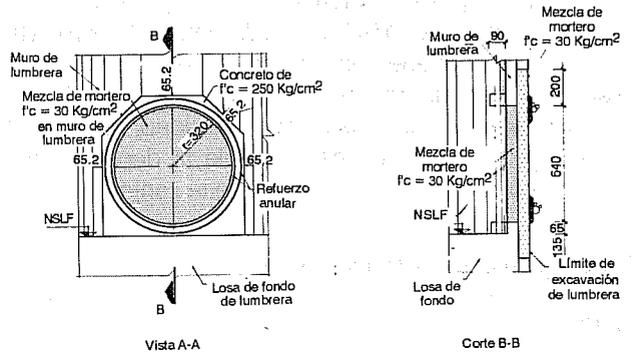
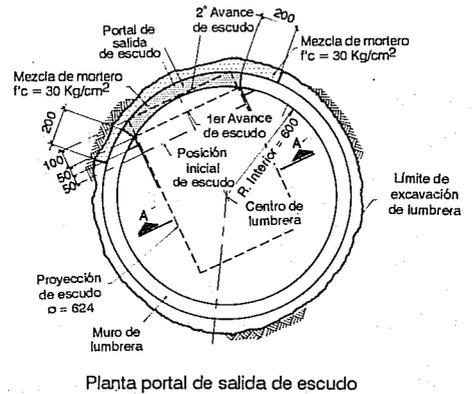
Resultados de la instrumentación en lumbreras flotadas

El éxito de la aplicación de este método se ha comprobado no sólo en la cantidad de lumbreras construidas, sino a través de los resultados de la instrumentación en ellas. Como ejemplo se describen

7. Análisis de estabilidad para la excavación en suelos cohesivos



8. Modificación al portal de salida



las mediciones obtenidas en las lumbreras utilizadas como "cárcamo de bombeo", "de rejillas" y "de control" pertenecientes a la planta de bombeo Miramontés, localizada en una zona donde el subsuelo se clasifica como de transición baja, por estar muy cerca de la llamada zona del lago.

En el perfil estratigráfico típico de este sitio, se distingue un estrato superficial de rellenos, limos, arenas y arcillas en los 10 m iniciales y un estrato de arcillas blandas y limos arcillosos (CH y CH - MH) en los 15 m restantes. A partir de los 25 m de profundidad y con un espesor mayor a 7.5 m se encuentra la primera capa dura.

La instrumentación consistió en colocar inclinómetros, piezómetros de respuesta rápida y abiertos, y bancos de nivel superficial, donde se obtuvieron mediciones durante el periodo de construcción de las lumbreras que fue aproximadamente de un año. Los inclinómetros usados para cuantificar los desplazamientos horizontales (radiales y tangenciales) que el suelo vecino experimenta al efectuar la excavación de la lumbrera, registraron movimientos máximos de 6 y 4 cm a 18 y 9 m de profundidad, respectivamente. Estos desplazamientos representan deformaciones unitarias del suelo del orden de 0.3 a 0.4%, valores mucho menores al 1%, rango teórico a partir del

cual las arcillas del Valle de México alcanzan el límite de falla. Las últimas mediciones indicaron que existe una tendencia a la recuperación parcial del suelo una vez inyectada la zanja anular.

Por su parte, los piezómetros instalados a 14.5 y 20 m de profundidad, registraron leves incrementos de 0.2 a 0.4 kg/cm² en la presión de poro durante las etapas de excavación, estabilizándose nuevamente al inicio de la inyección de la zanja anular. El nivel freático permaneció estable en todas las etapas. Las lecturas de los bancos de nivel superficial demuestran que los desplazamientos verticales en superficie fueron insignificantes, ya que se presentaron asentamientos y expansiones menores a 1 centímetro.

De esta manera, con las mediciones obtenidas en la instrumentación se ha comprobado la eficiencia de este procedimiento constructivo de lumbreras en suelos blandos.

Conclusiones y recomendaciones

Las diversas y difíciles condiciones del subsuelo en el que se han construido los túneles y lumbreras del Sistema de Drenaje Profundo de la ciudad de México, han obligado tanto a ingenieros especialistas como a las propias autoridades del DDF, a buscar soluciones de diseño y construcción dentro de los límites de seguridad, eficiencia y economía. Para las lumbreras se tienen diferentes procedimientos constructivos, que han demostrado ser eficaces en sus etapas de construcción y operación. No obstante, se agregan innovaciones y realizan estudios para mejorar dichos procedimientos.

Los programas de instrumentación de las obras

han jugado un papel importante en esta evolución y en las nuevas técnicas por desarrollar; sin embargo, es deseable se mantengan y profundicen mediante investigaciones que interpreten y correlacionen los resultados de la instrumentación con los que actualmente se cuenta y a partir de ellos, complementar e integrar normas para el diseño y construcción de lumbreras.

Referencias

- Alberro, J. y G. Auvinet. *Construcción de estaciones del Metro a gran profundidad en las arcillas del Valle de México*, Informe elaborado para Covitur, Instituto de Ingeniería, UNAM, México 1984.
- Amavizca F. R. *Análisis de métodos para la construcción de lumbreras del Sistema de Drenaje Profundo de la ciudad de México*, Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica, 1991.
- Departamento del Distrito Federal. *Memoria de las obras del Sistema de drenaje profundo del Distrito Federal*, México 1975.
- Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica. *El Sistema de drenaje profundo de la ciudad de México*, Secretaría General de Obras, DDF, México 1988.
- Geotec. *Estudio de mecánica de suelos de la planta de bombeo Canal de Miramontes, en México, D.F.* Geotec 1985. E Informes de la Instrumentación de la Planta de Bombeo de Miramontes, 1986-1987.
- Tinoco, J. R. Fundador de la Comisión de Túneles. Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica. Trabajo no publicado, 1989-1991.
- Túnel S.A. de C.V. *Memoria técnica de las obras del drenaje profundo del Distrito Federal*, (Tomo I), México 1976.
- Xanthakos P. *Slurry Walls*, Mc. Graw Hill, 1979.