



---

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
Licenciatura en Ingeniería Civil

**“Diseño geotécnico de la Lumbra 04 del Túnel Emisor  
Oriente”**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE

**INGENIERO CIVIL**

**P R E S E N T A**

**CARLOS ALFONSO RAMÍREZ DE ARELLANO DE LA PEÑA**

Director de tesis: M.I. Sergio Macuil Robles

Tutor asesor: M.I. Yolanda Alberto Hernández

Sinodales: Ing. Luis Zárate Rocha

M.I. Miguel Ángel Rodríguez Vega

M.I. Agustín Deméneghi Colina

Ing. Marcos Trejo Hernández

MÉXICO, D.F. A 31 DE ENERO DE 2012



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## A G R A D E C I M I E N T O S

---

A la **Universidad Nacional Autónoma de México**, por su férrea formación.

A la **Facultad de Ingeniería** por su entrenamiento constantemente lleno de desafíos técnicos y también de crecimiento personal.

A la **Comisión Nacional del Agua (CONAGUA)**, al consorcio **Constructora Mexicana de Infraestructura Subterránea (COMISSA)**, a la **Fundación ICA (FICA)** y al **Colegio de Ingenieros Civiles de México (CICM)** porque gracias al convenio de apoyo a Jóvenes Profesionistas, trabajos de tesis como el presente son posibles mediante el otorgamiento de una beca económica. También todo el reconocimiento sobre todo a CONAGUA, COMISSA e ICA por el permiso en el uso libre de la información y por una constante disposición a colaborar e impulsar este trabajo.

## ÍNDICE GENERAL

|           |   |           |
|-----------|---|-----------|
| <b>1.</b> | <b>Antecedentes. Información general.....</b>   | <b>5</b>  |
| 1.1.      | Definición de túnel y de lumbrera.....  | 5         |
| 1.2.      | Clasificación de lumbreras.....   | 6         |
| 1.3.      | Diferentes procedimientos constructivos: tipos de excavación, estabilización, equipo.....                       | 7         |
| <b>2.</b> | <b>Análisis geotécnico de lumbreras.....</b>  | <b>14</b> |
| 2.1.      | Métodos analíticos.....   | 14        |
| 2.2.      | Modelos numéricos.....  | 14        |
| <b>3.</b> | <b>Caso de estudio: Lumbrera 04 del Túnel Emisor Oriente.....</b>   | <b>16</b> |
| 3.1.      | Antecedentes del proyecto. Identificación de la necesidad.....  | 16        |
| 3.2.      | Ubicación, datos generales del proyecto.....  | 22        |
| 3.3.      | Caracterización y ubicación de la lumbrera 04.....  | 23        |
| 3.4.      | Geología.....   | 23        |
| 3.5.      | Exploración geotécnica y pruebas de laboratorio.....  | 28        |
| 3.6.      | Perfiles estratigráficos.....   | 38        |
| 3.7.      | Procedimiento constructivo.....   | 46        |
| 3.8.      | Alcances del diseño geotécnico.....   | 61        |
| 3.8.1.    | Parámetros geotécnicos.....   | 60        |
| 3.8.2.    | Métodos analíticos.....   | 61        |
| 3.8.3.    | Modelado numérico.....  | 72        |
| 3.9.      | Método del elemento finito.....   | 73        |
| 3.9.1.    | Antecedentes.....   | 73        |
| 3.9.2.    | Plaxis.....   | 74        |
| 3.9.3.    | Modelado en Plaxis.....   | 75        |
| 3.9.3.1.  | Datos de entrada.....   | 75        |
| 3.9.3.2.  | Tipos de análisis.....  | 84        |
| 3.9.3.3.  | Obtención de resultados.....  | 85        |
| 3.10.     | Resultados del análisis.....  | 86        |
| 3.10.1.   | Comparación de los métodos analíticos con el modelado numérico.....   | 89        |
| <b>4.</b> | <b>Árbol resumen de resultados.....</b>   | <b>93</b> |
| 4.1.      | Elección de método, tipo particular de procedimiento constructivo, modelo elegido, análisis realizado etc. .... | 93        |
| <b>5.</b> | <b>Conclusiones.....</b>  | <b>94</b> |
| <b>6.</b> | <b>Referencias.....</b>   | <b>96</b> |

## DISEÑO GEOTÉCNICO DE LA LUMBRERA 04 DEL TÚNEL EMISOR ORIENTE

---

### 1. Antecedentes. Información general

#### 1.1. Definición de túnel y de lumbrera

Los túneles son estructuras subterráneas de infraestructura de sección cerrada por la cual se puede conducir agua potable, aguas residuales, aguas pluviales, alojar un camino, ferrocarril entre otros. Estas obras alcanzan día a día dimensiones y profundidades crecientes debido al desarrollo de las grandes ciudades que, al reducir los espacios en superficie, favorecen la creación de estructuras subterráneas y/o elevadas.

Algunos túneles presentan características de gran complejidad, por ejemplo su profundidad creciente, su ubicación en laderas con cierto grado de inestabilidad o en suelos donde pudiera presentarse una importante variación piezométrica durante la construcción y la etapa de servicio de la obra, incluyendo suelos en proceso de consolidación. Algunos otros, en carreteras y autopistas, son llamados “túneles falsos” debido a que en realidad son túneles que se construyen a nivel del camino (posteriormente se hace un relleno sobre ellos) y conducen hacia un túnel “verdadero” (generalmente un túnel que cruza un cerro o montaña) y su función principal es proteger el camino y a sus usuarios de posibles caídos de algún talud.



**Figura 1.- Túnel con revestimiento a base de dovelas en proceso de construcción. Se observan las múltiples instalaciones de ventilación y energía eléctrica en la parte superior. En la parte inferior un tendido de vías férreas para el suministro de dovelas y transporte de personal al frente de excavación. La foto corresponde al TEO viendo hacia el Portal de Salida, en Hidalgo.**

Por otro lado, las lumbreras son excavaciones verticales por la cual se puede tener acceso a instalaciones o estructuras subterráneas. Construidas bajo muy diferentes técnicas, estos pozos

verticales tienen un diámetro mayor al del túnel que intersecan y permiten bajar el equipo de excavación, realizar operaciones durante la construcción como la evacuación del material de rezaga y, durante su operación, sirven para darle mantenimiento al túnel. En ocasiones, se utilizan como cárcamos de bombeo.

Los principales retos en la construcción de lumbreras son el no provocar movimientos indeseables en las construcciones u obras de infraestructura contiguas, ya sea durante su periodo de construcción o bien que la emersión de la estructura en presencia de consolidación regional tampoco afecte estas construcciones y servicios a largo plazo. Generalmente las lumbreras se construyen antes del paso del túnel, pudiéndose presentar el caso (y un reto por delante) de construir la lumbrera cuando el túnel ya esté hecho.

La tecnología desarrollada en la ingeniería de túneles y lumbreras adopta varios conceptos de la industria minera donde tiene un gran desarrollo.

### **1.2. Clasificación de lumbreras**

Una clasificación para las lumbreras de acuerdo a su función específica en un proyecto de túnel pueden clasificarse de dos maneras:

- A. **Lumbreras de ensamble.**- se denominan así a las lumbreras donde se baja el equipo para la excavación del túnel independientemente del procedimiento constructivo empleado. Pueden ser varias las lumbreras de ensamble dependiendo la magnitud del proyecto. Por ejemplo, si la excavación del túnel se realiza por medio de diferentes frentes de excavación y cada uno de estos frentes posee un escudo, las lumbreras de ensamble serán aquellas a donde lleguen los diversos componentes del escudo para que, abajo, vía la lumbrera, se lleve a cabo el montaje del escudo. Estas lumbreras poseen por lo general dimensiones mayores a las de las lumbreras de servicio.
  
- B. **Lumbreras de servicio.**- son aquellas lumbreras que funcionan para la salida de rezaga del frente de excavación, la entrada y salida de herramienta y personal.



*Figura 2.- Aspecto aéreo de una lumbra de servicio sobre el trazo del TEO.*

### **1.3. Diferentes procedimientos constructivos: tipos de excavación, estabilización, equipo**

Para la construcción de lumbreras existen diferentes procedimientos constructivos entre los que destacan:

- A. **Procedimiento convencional.**- este método se asocia a suelos firmes cuya excavación generalmente se hace en secciones por medio de retroexcavadora y retirando la rezaga en contenedores de diferente capacidad mediante una grúa. En ocasiones, cuando se presentan estratos gravosos, con roca fragmentada o roca masiva, se hace necesario el empleo de explosivos para avanzar en la excavación del núcleo. Los métodos de estabilización son variados pudiendo ser, dependiendo de la capacidad de autoaporte del suelo, un primer y único revestimiento de concreto lanzado reforzado con fibras metálicas (o de polímero) por ejemplo, y en caso de ser necesario un revestimiento definitivo de concreto reforzado. También pudiera ser un revestimiento primario de concreto lanzado reforzado con fibras pero combinado con anillos metálicos para brindar mayor soporte. Finalmente se colaría un revestimiento definitivo de concreto reforzado convencional.



*Figura 3.- En la foto de la izquierda se muestra un revestimiento primario hecho a base de concreto lanzado y perfiles metálicos, también se aprecia la excavación del núcleo con retroexcavadora. En la fotografía de la derecha se muestra el lanzado de concreto. En ambas fotografías, se aprecian los conectores por cortante en los perfiles metálicos debido a que para el caso específico de esta lumbrera (L23-A) se colocará un segundo revestimiento de concreto reforzado convencional.*

- B. **Procedimiento de lumbrera flotada.-** esta técnica ha sido una de las más usadas en la zona lacustre del Valle de México surgida en los años 60. Consiste en construir un brocal circular, y en excavar por paneles una zanja circular, dejando un núcleo central de suelo sin excavar. Posteriormente se excava el núcleo estabilizando la excavación con lodo. A continuación se instala un tanque circular flotante sobre el lodo y se construye la estructura de la lumbrera sobre este tanque que se va sumergiendo en el lodo conforme se construye la lumbrera encima de él. Así, paulatinamente, se sumerge la estructura hasta alcanzar su posición final de diseño. El espacio anular vacío entre la lumbrera y el suelo se rellena con mortero.

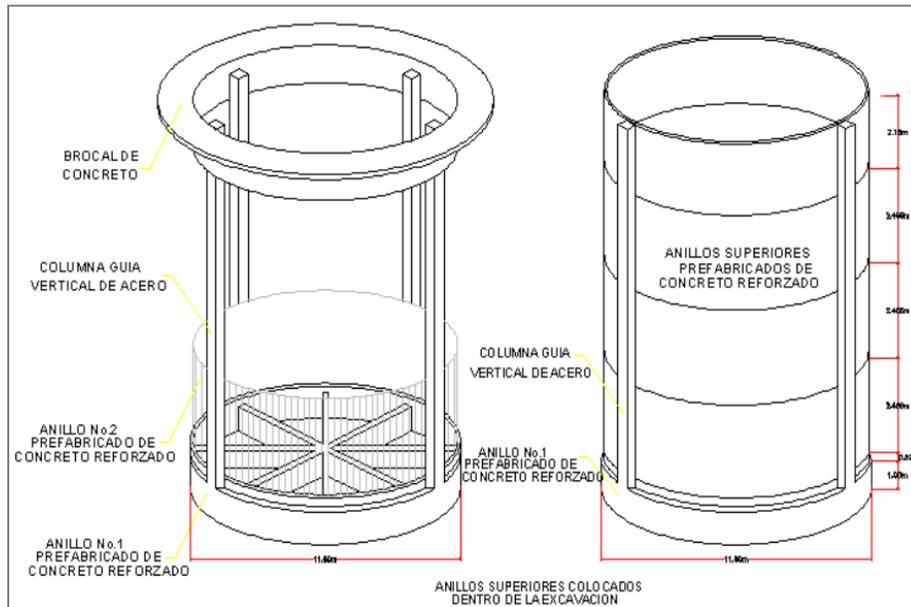


**Figura 4.- Construcción de una lumbreira flotada. En la foto de la izquierda se observa la excavación del núcleo inundado con lodo bentonítico; arriba a la derecha se observa el posicionamiento del tanque de flotación; abajo a la derecha se puede ver el tanque de flotación ya parcialmente sumergido y encima de éste la construcción de muros de concreto reforzado como revestimiento. Posteriormente se irá sumergiendo hasta llegar a la profundidad deseada. La lumbreira que se ilustra corresponde al Túnel Río de la Compañía.**

Las principales ventajas del método de flotación radican en que se pueden mantener un alto control de calidad en el procedimiento constructivo de la lumbreira ya que, prácticamente, se hace en la superficie; se eliminan las posibilidades de falla por extrusión en juntas de paneles de muros Milán y la posibilidad de falla de fondo.

- C. **Procedimiento de anillos prefabricados de concreto reforzado.-** El método de anillos de concreto reforzado nace como una alternativa al procedimiento de flotación. El primer paso de su procedimiento constructivo consiste en construir brocales de concreto reforzado, uno interior y otro exterior, para guiar a la almeja que realiza una excavación perimetral en secuencia alternada, misma que se estabiliza con lodo bentonítico. La excavación del núcleo se realiza empleando una almeja de otro tipo y de mayor capacidad que la guiada, sustituyendo de nueva cuenta el suelo por lodo bentonítico. Los anillos de concreto reforzado son muy esbeltos, generalmente de 0.15 m de espesor y hasta 3.0 m de altura, por lo que su manejo se hace delicado. Para cuando el núcleo esté totalmente excavado (y consecuentemente inundado de lodo bentonítico) los anillos ya deberán estar contruidos. El primer anillo que se baja a la lumbreira deberá tener vigas radiales que a su vez funcionarán como acero de refuerzo de la losa de fondo. También en ese primer anillo se sueldan vigas verticales de sección rectangular hueca en el perímetro para que funjan como guías para los siguientes anillos por bajar. Después de bajar 2 o 3 anillos (mismos que deberán estar suspendidos respecto al fondo de la excavación) se cuela la

losa de fondo, sobre la cual, teóricamente, descansan los anillos de concreto. Después de que la losa de fondo alcance una cierta resistencia, se baja la totalidad de los anillos y se hace un relleno anular entre los anillos y el suelo perimetral a base de mortero y bentonita. Se debe esperar a que el relleno perimetral tenga una cierta resistencia para evacuar el modo bentonítico que inunda el núcleo. Finalmente y después de limpiar las paredes de la lumbrera, se construye el revestimiento definitivo que consiste en otra losa de fondo y muros perimetrales de concreto reforzado utilizando cimbra deslizante.



**Figura 5.-** Conceptualización de una lumbrera de anillos. En la figura de la izquierda se aprecia el primer anillo ya colocado con las traves radiales que servirán de refuerzo para una primera losa de fondo. También se observan unas “columnas” guía unidas al brocal en superficie para la correcta colocación de los anillos superiores.

- D. **Procedimiento de muro Milán.**- los muros Milán en la construcción de lumbreras juegan un papel de tablestacado perimetral que permite, mediante una correcta ejecución de su construcción, un soporte anular (a pesar que los muros sean planos) que contenga adecuadamente los esfuerzos circunferenciales del terreno. Se comienza con la construcción de brocales en superficie que servirán de guías para la excavación de los tableros de muro Milán; posteriormente con la ayuda de una almeja o en su caso una hidrofresa (dependiendo si el suelo es blando o duro, respectivamente) comienza la excavación de los tableros estabilizando con lodo bentonítico para que una vez llegando al nivel máximo de excavación se introduzca el acero de refuerzo y se haga el colado con la ayuda de tubo tremie. La excavación de los tableros en todo el perímetro de la lumbrera debe ser de manera alternada y conservando en todo momento la verticalidad. Posterior a la construcción de los muros, se inicia la construcción de la trabe circular de

coronamiento que está a nivel de superficie y cuya función será unir estructuralmente todos los muros Milán, previo descabece de éstos. Una vez que se construye la trabe de coronamiento se procede a excavar el núcleo central de suelo por medios mecánicos hasta llegar a una cota fijada en proyecto donde se construye otra trabe circular (llamada ahora anillo de rigidez) que ayudará, como su nombre lo indica, a rigidizar la zona baja de la lumbrera cuando se abra paso para la tuneladora. Finalmente, se construye la losa de fondo.



**Figura 6.- En la fotografía de la izquierda se muestra el aspecto terminado de la Lumbrera 04 con muro Milán como revestimiento único. En la figura de la derecha se muestra una almeja bivalva accionada mecánicamente haciendo la excavación de un tablero precisamente para alojar al muro Milán. En esta foto también se observa la inundación con lodo bentonítico durante la excavación del tablero.**

- E. Procedimiento de excavación vertical mecanizada.-** Mientras que la tecnología que se presentó hace décadas para desarrollar las máquinas tuneladoras TBM ha avanzado rápidamente, los métodos utilizados en la actualidad para la construcción de lumbreras son comparativamente convencionales. La empresa alemana Herrenknecht, especialista en técnicas de excavación y tuneleo, cuenta con excavaciones verticales mecanizadas para la construcción de lumbreras por medio de una VSM Vertical Shaft Sinking Machine (o en español Máquina de Excavación Vertical de Lumbreras) que ellos mismos han patentado. Consiste básicamente en una herramienta de corte rotatoria sujeta a un brazo telescópico y éste sujeta a un “brocal” que se apoya en superficie o en las paredes laterales de la lumbrera conforme va avanzando la excavación. Este método de excavación puede ser utilizado en suelos blandos o firmes, estables o inestables, con o sin presencia de nivel freático. La estabilización consiste en inundar la lumbrera precisamente hasta el NAF con agua o con lodo bentonítico. El revestimiento se puede hacer en superficie por medio de concreto reforzado convencional y descenderlo conforme avanza la excavación (como sucediera con el método de flotación) o bien por

medio de dovelas. Los diámetros alcanzados en lumbreras construidas con esta maquinaria pueden llegar, hasta el momento y con base en los pocos proyectos ya realizados en Europa, hasta los 9.6 m de diámetro con profundidades de inclusive 160 m. La principal ventaja de este método consiste en que se requiere muy poco espacio para su montaje y ejecución comparado con algún otro método convencional, lo cual lo hace ideal para su implementación en ciudades.

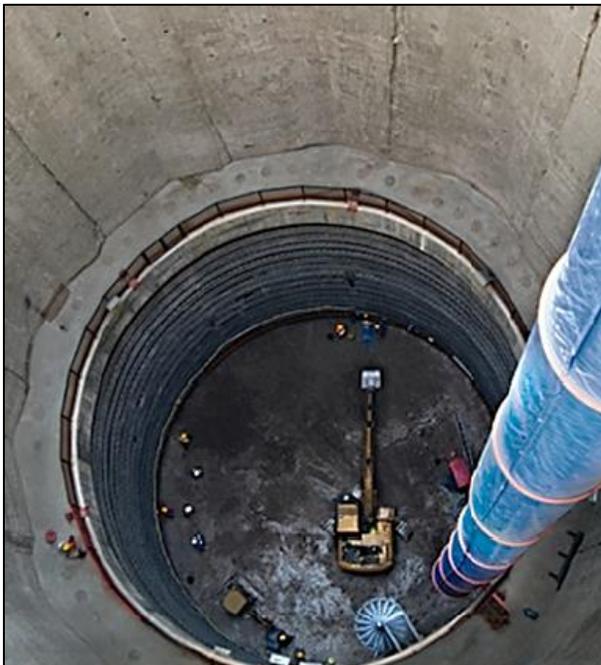


**Figura 7.- Conceptualización del método mecanizado. Aquí, una lumbrera de servicio para un túnel ya construido sobre roca.**



**Figura 8.- Implementación del método mecanizado en el proyecto de un túnel de drenaje para el río Emscher, en Alemania. La lumbrera cuenta con un diámetro de 9.0 m y 23.0 m de profundidad.**

A pesar de los métodos aquí descritos, la variedad en la construcción de lumbreras depende de las combinaciones que el proyectista pudiera adoptar para el procedimiento constructivo, por ejemplo, realizar una parte de la lumbrera con muro Milán (posiblemente donde se tengan suelos blandos) y posteriormente, si la estratigrafía lo permite, realizar estabilización por medio de concreto lanzado y anillos (cuando el terreno mejora conforme avanza la profundidad) entre otras combinaciones comunes en la práctica.



**Figura 9.- Método mixto en la construcción de la lumbrera: desde nivel de superficie y hasta determinada profundidad se utiliza muro Milán como revestimiento único; posteriormente, se estabiliza la excavación con el uso de anillos metálicos y concreto lanzado. Nótese la reducción del diámetro por medio de un anillo de rigidez.**

## **2. Análisis geotécnico de lumbreras**

### **2.1. Métodos analíticos**

Los métodos analíticos están enfocados sobre todo en la estabilidad de la excavación, movimientos de la masa de suelo y en las fuerzas de apuntalamiento. Los desplazamientos del suelo son generalmente la principal limitante para las obras subterráneas que se desarrollan en un entorno urbano y, debido a su importancia y a su proceso de cálculo tan exhaustivo no exento de errores, se opta por algún modelo numérico con el método del elemento finito que complementa el análisis.

Las consideraciones de estabilidad juegan un papel importante en el diseño de los sistemas de retención del empuje lateral de tierras. Los modelos de equilibrio límite son ampliamente utilizados en la práctica e incluyen diferentes cálculos como por ejemplo la falla de fondo, falla de fondo por subpresión, flotación, extrusión, falla por pateo (en caso de usar muro Milán), entre otros. Los modelos de equilibrio límite son cálculos semiempíricos basados en observaciones y en una relación de lo que resiste sobre lo que actúa, generando así factores de seguridad que se han de comparar con factores de seguridad mínimos recomendados por reglamento de construcción.

En el caso de los soportes para excavaciones profundas como lo es una lumbrera, suelen usarse comúnmente muros de retención por medio de pilas tangentes o secantes, o muros diafragma conocidos ampliamente como muros Milán. Generalmente dichos muros de retención son apuntalados, anclados, o retenidos mediante arcos metálicos. El diseño estructural se enfoca en hacer un sistema que pueda soportar las cargas de proyecto y que pueda controlar hasta hacer casi nulos los movimientos en superficie. Para el diseño de dichos muros es importante satisfacer al menos los siguientes puntos: a) suficiente resistencia para las cargas de diseño, b) tener la suficiente rigidez para soportar las deformaciones por flexión, c) tener una longitud de empotramiento suficiente para garantizar estabilidad y d) satisfacer las necesidades de impermeabilidad al interior de la excavación.

### **2.2. Modelos numéricos**

En los últimos 30 años se ha tenido un incremento en la demanda para obtener una mayor precisión en los modelos que simulan problemas geotécnicos. Esta necesidad se ha visto satisfecha en parte porque en la actualidad se cuenta con el equipo necesario para realizar cálculos haciendo menos consideraciones respecto a épocas pasadas lo cual acerca a los modelos más a la realidad. Con los programas de computadora actuales basados en el método del elemento finito es posible simular aspectos detallados del procedimiento constructivo de una amplia cantidad de problemas geotécnicos. A modo de ejemplo se pueden citar a STARDYNE,

ANSYS, ABAQUS, ADINA, FLAC, PARIS, MIDAS GTS y PLAXIS, entre otros. Estas herramientas son poderosamente versátiles para conocer las deformaciones que tendríamos en superficie debidas a una excavación profunda, por ejemplo.

La modelación numérica puede ser usada como una herramienta predictiva ante un comportamiento esperado, o para verificar y calibrar su eficiencia teniendo en cuenta las consideraciones hechas (asunciones, modelo constitutivo, materiales introducidos etc.) respecto a una precisa calibración en campo que corrobore los resultados.

Para que un modelo numérico pueda ser utilizado confiablemente en la ejecución del análisis de un problema geotécnico, el ingeniero debe reconocer plenamente qué consideraciones y aproximaciones se están haciendo y debe conocer también qué grado de incertidumbre conlleva un análisis de este tipo. Un componente imprescindible en el análisis por modelos numéricos es el modelo constitutivo usado para representar la respuesta mecánica de los materiales involucrados. Habrá que ser cuidadosos de usar un modelo constitutivo acorde a los materiales que queremos representar (suelo, roca, concreto, compuestos) y verificar que los parámetros que requieren dichos modelos electos se ajusten a nuestros alcances en cuanto a complejidad y tiempo para el trabajo en laboratorio.

La principal ventaja de las simulaciones numéricas en excavaciones profundas es la posibilidad de modelar complejas secuencias de construcción y excavación así como de incorporar propiedades detalladas del sistema estructural utilizado para estabilizar la excavación. Si el procedimiento constructivo es conocido en su totalidad de antemano, un modelo numérico le permite al ingeniero conocer al detalle las causas que originan un cambio en el estado de esfuerzos del suelo como los ciclos de excavación, abatimiento del nivel freático, el apuntalamiento o remoción de troqueles/anillos metálicos, construcción de los muros Milán entre otras.

Cualquier modelo deberá corroborarse exhaustivamente principiando por los datos de entrada de materiales, geometría, etapas constructivas y, los resultados, deberán exponerse y criticarse desde la perspectiva de la experiencia e intuición del ingeniero.

### **3. Caso de estudio: Lumbrera 04 del Túnel Emisor Oriente**

#### **3.1. Antecedentes del proyecto. Identificación de la necesidad**

La Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) fue edificada sobre una cuenca cerrada en la cual los lagos Xaltocan, Texcoco, Zumpango, Xochimilco y Chalco, en época de lluvias, se unían formando un espejo de agua de cerca de 2 000 km<sup>2</sup>. Así, desde la fundación de la ciudad de Tenochtitlan la condición de inundaciones periódicas era una realidad lo que obligó a sus

gobernantes a pensar en alternativas para el manejo de las aguas pluviales y de las aguas residuales.



**Figura 10.- Condiciones del Valle de México antes de la Conquista. Se observa el espejo de agua formado por los lagos de Zumpango, Xaltocan, Texcoco, Xochimilco y Chalco. Se observan también sus afluentes.**

Entre los siglos XVII y XVIII se construyó el Tajo de Nochistongo por órdenes del virrey Luis de Velasco motivado por la gran inundación de 1555. Así, en 1607 se iniciaron las obras de la primera salida de aguas artificial de la cuenca cerrada a cargo de Enrico Martínez. Serias deficiencias en la construcción y el diseño hicieron que la obra quedara lista 181 años después, en 1789.

Posteriormente en 1885 iniciaron las obras del Gran Canal del Desagüe por mandato del presidente Porfirio Díaz y la obra estuvo a cargo del ingeniero Luis Espinosa, titular de la Junta Directiva del Desagüe. El Canal comienza al oriente de la Ciudad y concluye en las cercanías de Zumpango donde es un túnel, con una longitud total de 47.5 km. Únicamente el túnel cuenta con una longitud de 10.2 km, de sección oval y se une en su salida con el río Tequixquiac. En 1894 quedó concluida la parte del túnel y a principios de 1900 se inauguró el Gran Canal del Desagüe con una capacidad de 80 m<sup>3</sup>/s.



***Figura 11.- Aspecto del Gran Canal del Desagüe en su inauguración en 1900. Una de las tantas obras insignia del Porfiriato. Su construcción de cerca de 15 años se justificó con los enormes beneficios que dio a la población en aquel entonces. Hoy, a pesar de la pérdida de pendiente y de las plantas de bombeo que han tenido que construirse para que continúe operando, sigue aportando una capacidad razonable de desagüe de aguas residuales a la Ciudad.***

En 1962 se inauguró el Túnel Emisor Poniente conduciendo un caudal de 30 m<sup>3</sup>/s con 15 km de túneles y un canal revestido a cielo abierto. Con su ampliación a 32.3 km entre 1963 y 1964, su capacidad aumentó a 80 m<sup>3</sup>/s. El trazo del Emisor Poniente va de Naucalpan a Tepotzotlán en el Estado de México, llevando aguas pluviales hacia el río Cuautitlán, la Laguna de Zumpango y el Tajo de Nochistongo, evitando así la sobrecarga del Gran Canal.

El Drenaje Profundo es un sistema integrado por el Túnel Emisor Central y 9 interceptores con una longitud total de 153 km. En 1967 se inició su construcción y fue en 1975 cuando se concluyó el Emisor Central, con 50 km de longitud y 6.5 m de diámetro. Su trazo inicia en la delegación Gustavo A. Madero, en Cuauhtpec, y termina en el Valle del Mezquital, en Hidalgo, en el río El Salto cerca de la presa Requena. Su capacidad máxima fue de 200 m<sup>3</sup>/s, teniendo profundidades variables entre los 50 y 237 m. En una segunda etapa se construyeron los

Interceptores Oriente y Central que confluyen en el Emisor Central. El Interceptor Oriente tiene 10 km de longitud y se construyó con la finalidad de aliviar al Gran Canal y el Interceptor Central aliviaría la parte central y norte de la Ciudad, con sus 8 km de longitud.

El Drenaje Profundo fue diseñado para la evacuación de aguas pluviales sin embargo a partir de 1992 conducen aguas negras debido a la pérdida de pendiente del Gran Canal, lo cual ha obligado a que trabaje ininterrumpidamente con la inherente falta de mantenimiento y potencial posibilidad de falla. Actualmente el sistema del Drenaje Profundo cuenta con los siguientes elementos:

| Conducto                          | Longitud<br>(km) | Diámetro<br>(m) | Capacidad<br>(m <sup>3</sup> /s) | Profundidad<br>(mín-máx) |
|-----------------------------------|------------------|-----------------|----------------------------------|--------------------------|
| Emisor Central                    | 50.0             | 6.5             | 220.0                            | 48.-217                  |
| Interceptor Central               | 16.1             | 5.0             | 90.0                             | 22-41                    |
| Interceptor Centro-Centro         | 3.7              | 5.0             | 90.0                             | 25-26                    |
| Interceptor Oriente               | 22.2             | 5.0             | 85.0                             | 37-55                    |
| Interceptor Centro-Oriente        | 16.0             | 4.0             | 40.0                             | 22-51                    |
| Interceptor del Poniente          | 16.5             | 4.0             | 25.0                             | 20-40                    |
| Interceptor Iztapalapa            | 5.5              | 3.1             | 20.0                             | 11-16                    |
| Interceptor Obrero Mundial        | 0.8              | 3.2             | 20                               | 10-16                    |
| Interceptor Oriente Sur           | 13.8             | 5.0             | 85                               | 20-23                    |
| Canal Nacional-Canal de<br>Chalco | 8.7              | 3.1             | 20                               | 15-17                    |

**Tabla 1.- Características y condiciones de operación actuales del sistema de Drenaje Profundo.**

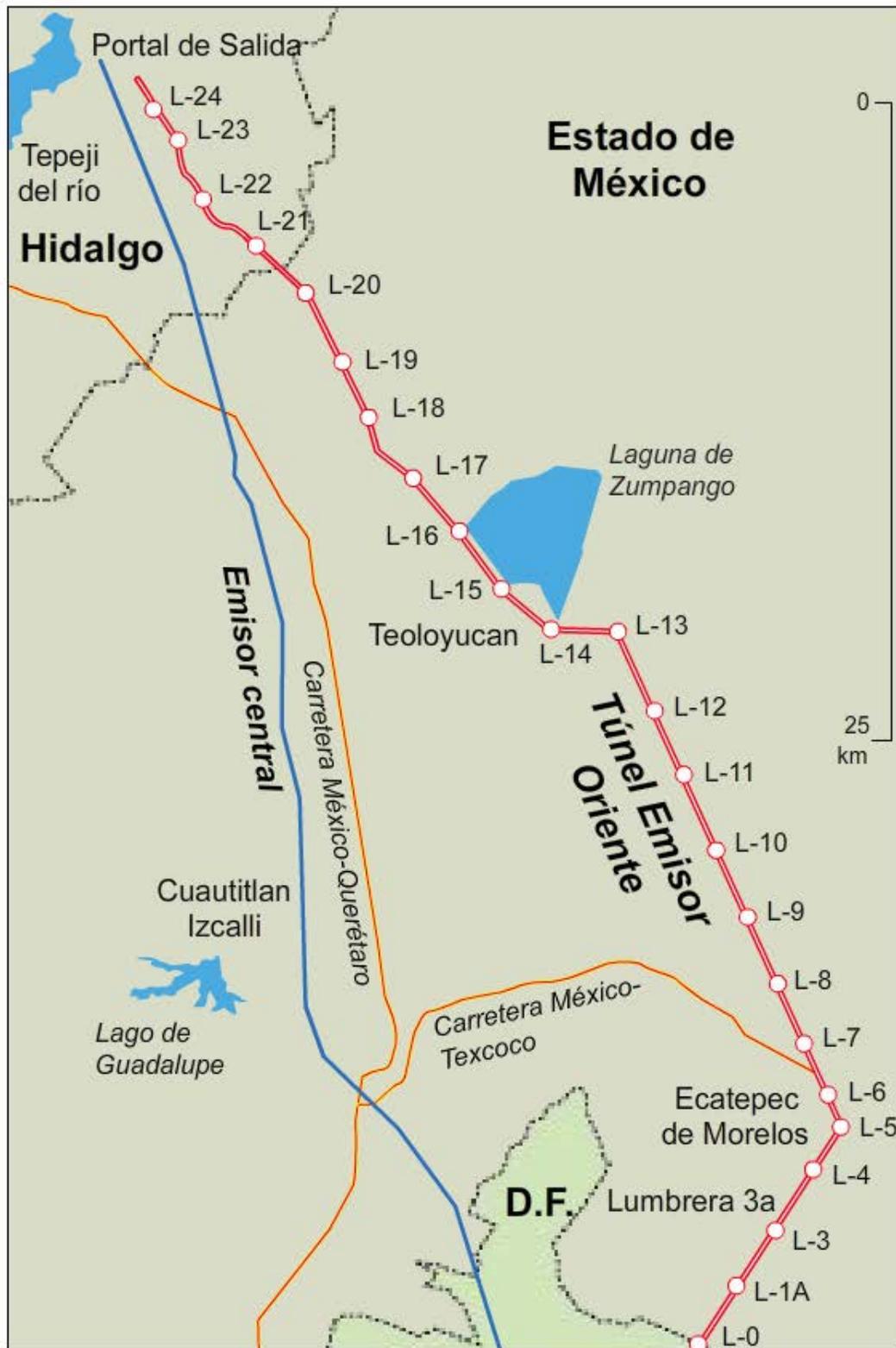
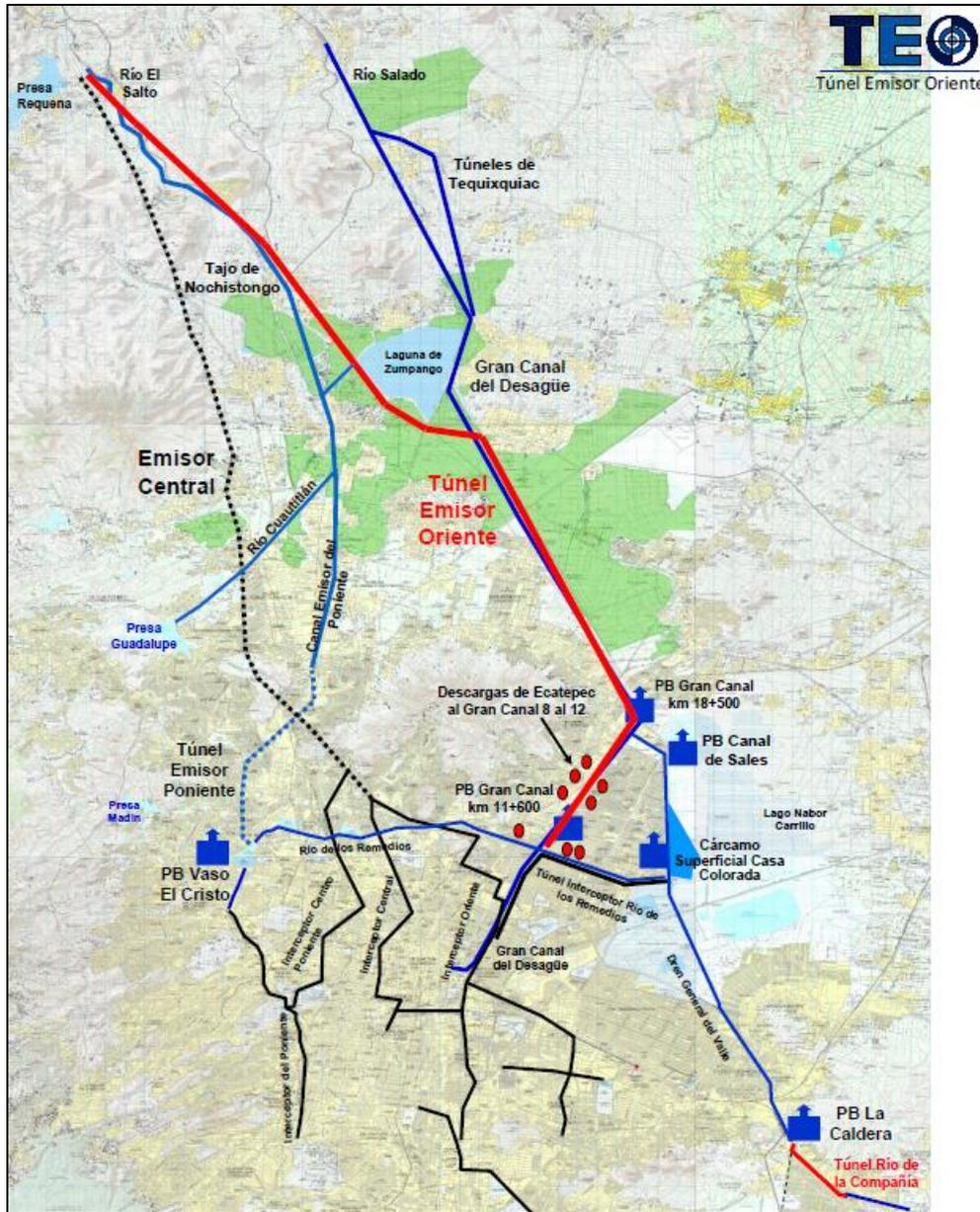


Figura 12.- Trazo en planta del TEO. Se muestran sus 24 lumbreras y el portal de salida, en Hidalgo. La mayor parte de la obra se localizará dentro del Estado de México.



**Figura 13.- Trazo del TEO en planta junto con el sistema de Drenaje Profundo que opera actualmente. Se observa cómo el trazo va hacia el nororiente en su inicio para evitar las formaciones rocosas de la Sierra de Guadalupe, siendo paralelo al Gran Canal del Desagüe hasta la Laguna de Zumpango donde se separan. Se muestra también la comunicación que se tendrá con el Túnel Río de la Compañía.**

El Valle de México se encuentra actualmente en una situación crítica debido a la ocurrencia simultánea de varios factores adversos: existe una sobreexplotación de los mantos acuíferos con la extracción de agua potable lo cual favorece y acelera el hundimiento regional de la Zona Metropolitana haciendo que las obras existentes como el Gran Canal pierdan pendiente; se pierde la capacidad de desalojo del Túnel Emisor Central debido a que, al menos hasta 2008, el mantenimiento que recibió fue menor; además únicamente cerca del 10% de las aguas residuales

evacuadas de la Zona Metropolitana son tratadas, lo cual favorece el deterioro de la salud de las comunidades colindantes en los portales de salida; y finalmente, la poca conciencia de la ciudadanía en el uso eficiente y ahorro del agua potable y para no tirar basura en las calles que congestione el sistema de desalojo de aguas negras y pluviales. Este conjunto de factores hace que la situación del drenaje para 20 millones de personas sea crítica y que la posibilidad de una o varias inundaciones de gran magnitud sea latente.



***Figura 14.- Estado actual del Túnel Emisor Central, componente principal del sistema de Drenaje Profundo. En la fotografía se alcanzan a ver las varillas de refuerzo expuestas con un cierto nivel de corrosión, desconchamientos diversos en la superficie de concreto y filtraciones. El incremento en la rugosidad de las paredes debido a estos fenómenos afecta la capacidad de desagüe, ya que la velocidad del flujo disminuye.***

Al día de hoy, el sistema de desagüe tiene una capacidad de 195 m<sup>3</sup>/s y está integrado por el Gran Canal, el Túnel Emisor Poniente y el sistema de Drenaje Profundo. Para cubrir las necesidades de desalojo de aguas negras y de lluvia es necesario disponer de una capacidad total de al menos 315 m<sup>3</sup>/s para satisfacer a los 20 millones de habitantes. Lejos de incrementar la capacidad de desagüe al ritmo en que crecía la población, aquella disminuyó por la pérdida de pendiente debida al hundimiento regional así como por la falta de mantenimiento de los sistemas de drenaje. La pérdida de pendiente ha obligado en años recientes a la instalación de plantas de bombeo para desalojar un volumen de aguas residuales importante a través del Gran Canal construido hace más de un siglo. El Gran Canal del Desagüe actualmente desaloja 45 m<sup>3</sup>/s, el Túnel Emisor Poniente 30 m<sup>3</sup>/s y el Túnel Emisor Central 120 m<sup>3</sup>/s, resultando en un déficit de desagüe de 120 m<sup>3</sup>/s.

Así nace una serie de acciones enfocadas a revertir dicha situación con el Programa de Sustentabilidad Hídrica de la Cuenca del Valle de México elaborado y puesto en marcha por la Comisión Nacional del Agua, convocado por el Gobierno Federal y coordinando a los Gobiernos Estatales de Hidalgo, Estado de México y Distrito Federal. En dicho programa se enfatiza la recuperación de mantos acuíferos, el desarrollo de nuevas fuentes de abastecimiento de agua potable, el tratamiento del 100% de las aguas residuales evacuadas así como ampliar la capacidad del sistema de drenaje en 150 m<sup>3</sup>/s, por medio de la construcción del Túnel Emisor Oriente.

### **3.2. Ubicación, datos generales del proyecto**

El Túnel Emisor Oriente es una obra de infraestructura federal comenzando su construcción en agosto del 2008 y previendo su término en septiembre de 2012 con un monto estimado, en proyecto, de 14 mil 230 millones de pesos. Tendrá 62 km de longitud y 7.0 m de diámetro interior. Tendrá 24 lumbreras con profundidades entre los 32 y 150 m y un Portal de Salida. Las lumbreras de montaje tendrán un diámetro interior terminado de 16 m mientras que las de servicio tendrán un diámetro de 12 m. Las lumbreras tendrán entre sí una separación de 2.5 km aproximadamente. La excavación del túnel se divide en 6 frentes de trabajo de aproximadamente 10 km cada uno. Su capacidad de desalojo de aguas residuales será de 150 m<sup>3</sup>/s como ya se mencionó. En temporada de lluvias el TEO funcionará de manera simultánea con el Drenaje Profundo actual y en época de estiaje operará de forma alternada para permitir su mantenimiento.

El Túnel inicia en la Lumbrera 00 en la intersección de las avenidas Gran Canal y Río de los Remedios en la que actualmente es la Lumbrera 2 del Interceptor Río de los Remedios del Sistema de Drenaje Profundo, en la delegación Gustavo A. Madero en el DF. Posteriormente corre paralelo a la margen izquierda del Gran Canal por 10 km hacia el nororiente hasta la Lumbrera 05 en el cruce de Avenida Central y el Circuito Exterior Mexiquense, frente al centro comercial Plaza de las Américas en Ecatepec, Estado de México. Después hace un cambio hacia el norponiente pasando ahora a ser paralelo en la margen derecha del Gran Canal cruzando los municipios de Ecatepec, Coacalco y Tultepec a lo largo de 20 km. Después se separa del Gran Canal pasando por el poniente de la Laguna de Zumpango cruzando los municipios de Teoloyucan y Huehuetoca aproximadamente 20 km más. Finalmente sigue por la margen derecha del Tajo de Nochistongo, atraviesa el municipio de Melchor Ocampo y llega al Portal de Salida en el Ejido de Conejos, en Hidalgo.

### **3.3. Caracterización y ubicación de la Lumbrera 04**

La Lumbrera 04 será una lumbrera de servicio localizada en el km 8+211.835 del trazo del TEO y tiene una profundidad de excavación de 51.0 m aproximadamente. Algunos datos geométricos son los siguientes:

- Nivel de plataforma de trabajo: 2 234.207 msnm
- Nivel de rasante hidráulica del túnel: 2 188.395 msnm
- Coordenadas UTM del centro de la lumbrera:

$$X=496\ 363.652$$

$$Y=2\ 163\ 361.410$$

Se estabilizará la excavación por medio de muro Milán estructural de 1.0 m de ancho, siendo el revestimiento único de la lumbrera. En la parte superior se construirá una trabe de coronamiento de concreto reforzado que ligará estructuralmente los paneles de los muros Milán. La Lumbrera tendrá un diámetro de 13.5 m sin embargo a 37 m de profundidad se construirá un anillo de rigidez de concreto reforzado que ayudará a resistir los esfuerzos generados en el muro Milán cuando se demuela para el paso de la tuneladora. Así, el diámetro mínimo de la Lumbrera queda en 12 m. Además, la excavación en el núcleo confinado por el mismo muro Milán será en avances verticales cuya altura dependerá únicamente de los rendimientos que tenga la extracción del material.

### **3.4. Geología**

Con base en las observaciones del Dr. Federico Mooser en su reporte geológico, el TEO se excava en 6 formaciones geológicas reconocidas y documentadas, todas de naturaleza volcánica. Cortará un 10% rocas duras no alteradas y en un 90% suelos, poco consolidados en el sur y, mediana y fuertemente consolidados en el norte.

En el sur (zona de interés de diseño de la Lumbrera 04) el túnel avanzará en depósitos lacustres poco permeables los cuales aportarán poco agua al frente de excavación y en cantidades manejables.

En otras zonas del trazo, por ejemplo en el norte, los depósitos lacustres cortados son muy poco permeables y poco transmisibles; solamente en sitios de fallas tectónicas habrá aportaciones súbitas breves importantes de agua.

#### **A. Formación lacustre de la Cuenca de México**

Constituida por arcillas, limos y arenas intercaladas derivadas por sedimentación de partículas en lagos y de lluvias de erupciones volcánicas pumíticas caídas en un lago de aguas someras. En la secuencia estratigráfica aparecen además de los depósitos lacustres, algunos suelos de reducido espesor que se formaban cuando las aguas del lago se evaporaban en época de sequía. También se encuentran algunas capas delgadas de cenizas volcánicas basálticas. Aparece superficialmente un depósito de arcillas lacustres que avanza como cuña hasta las inmediaciones de la Lumbrera 08. El contenido de agua de las arcillas oscila entre 200 y 300% el cual contrasta con el contenido

de agua de las pumicitas subyacentes que se encuentra entre 50 y 100%. Esta formación es sobre la que se construye la Lumbreira 04.

#### **B. Formación de basaltos**

Las lavas y cenizas provenientes del cerro de Tultepec están inmersas en la formación lacustre de la cuenca. Por un intervalo de 11 km aproximadamente el trazo del TEO atraviesa lavas basálticas intercaladas entre los limos y arcillas lacustres. Entre las Lumbreras 10 y 14, se hallarán materiales con alta permeabilidad debido precisamente al basalto fracturado.

#### **C. Formación de suelos sublacustres**

Esta formación se compone principalmente de limos arenosos color café. Pudieran presentarse entre los estratos arenas y gravas fluviales. Son estratos altamente compactos de reducida permeabilidad.

#### **D. Formación de abanicos aluviales**

Son depósitos compuestos de arenas y gravas muy compactos color rojizo poco permeables. Forman un conjunto de sedimentos oxidados a la intemperie arriba del antiguo nivel freático regional.

#### **E. Formación de vulcanitas Huehuetoca**

Estas vulcanitas quedan contenidas en los abanicos aluviales que descansan sobre el flanco sur de la Sierra de Nochistongo. Afloran al suroeste de Huehuetoca donde forman un montículo de ignimbritas color rosa.

#### **F. Formación Taximay**

Esta formación es de origen lacustre y se compone de estratos alternados de arcillas, limosas, limos arenosos y puede contener capas de pómez fina o granular. Pudieran intercalarse ocasionalmente algunos estratos de arenas fluviales, gravas y hasta boleos empacados en tobas. La formación Taximay en su mitad inferior se compone de arcillas lacustres verdes fuertemente consolidadas mientras que en su mitad superior existen arcillas de color beige, amarillo, café claro o café menos consolidadas. Los colores característicos de la formación, en su parte inferior se deben a las cenizas de un vulcanismo basáltico y en la parte superior, sus colores claros se deben a las pómez de un vulcanismo ácido. La formación Taximay se caracteriza por una permeabilidad

baja debido a su avanzada consolidación en general. Puede decirse que los depósitos lacustres del norte de la Cuenca de México se formaron en un ambiente geológico similar a aquellos de la formación Taximay, sin embargo, difieren en edad geológica aproximadamente por 2 millones de años y por ende también difieren en su grado de consolidación y su contenido de agua (los depósitos del norte de la Cuenca son blandos y poco consolidados mientras que los de Taximay son duros y consolidados).

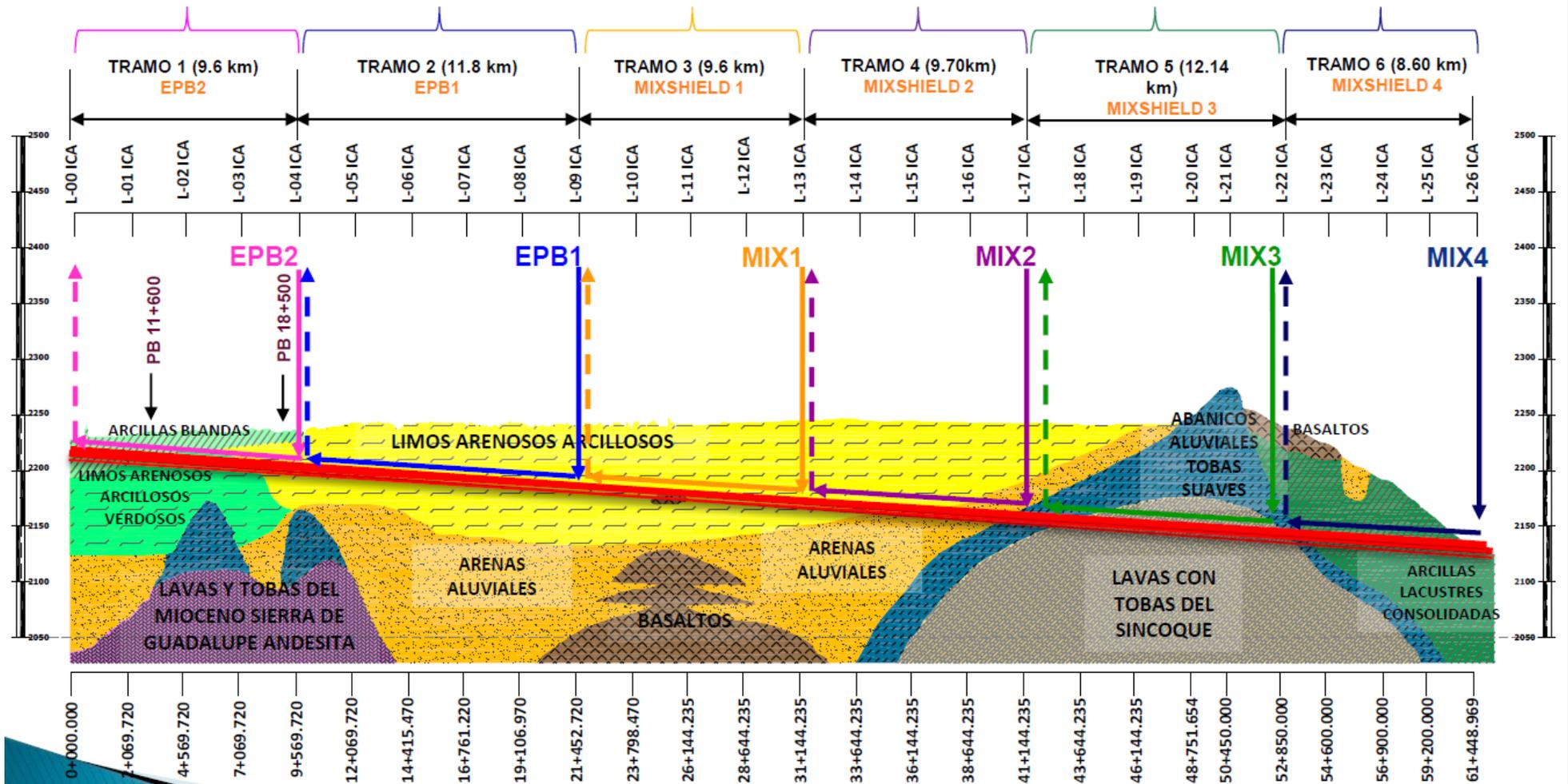
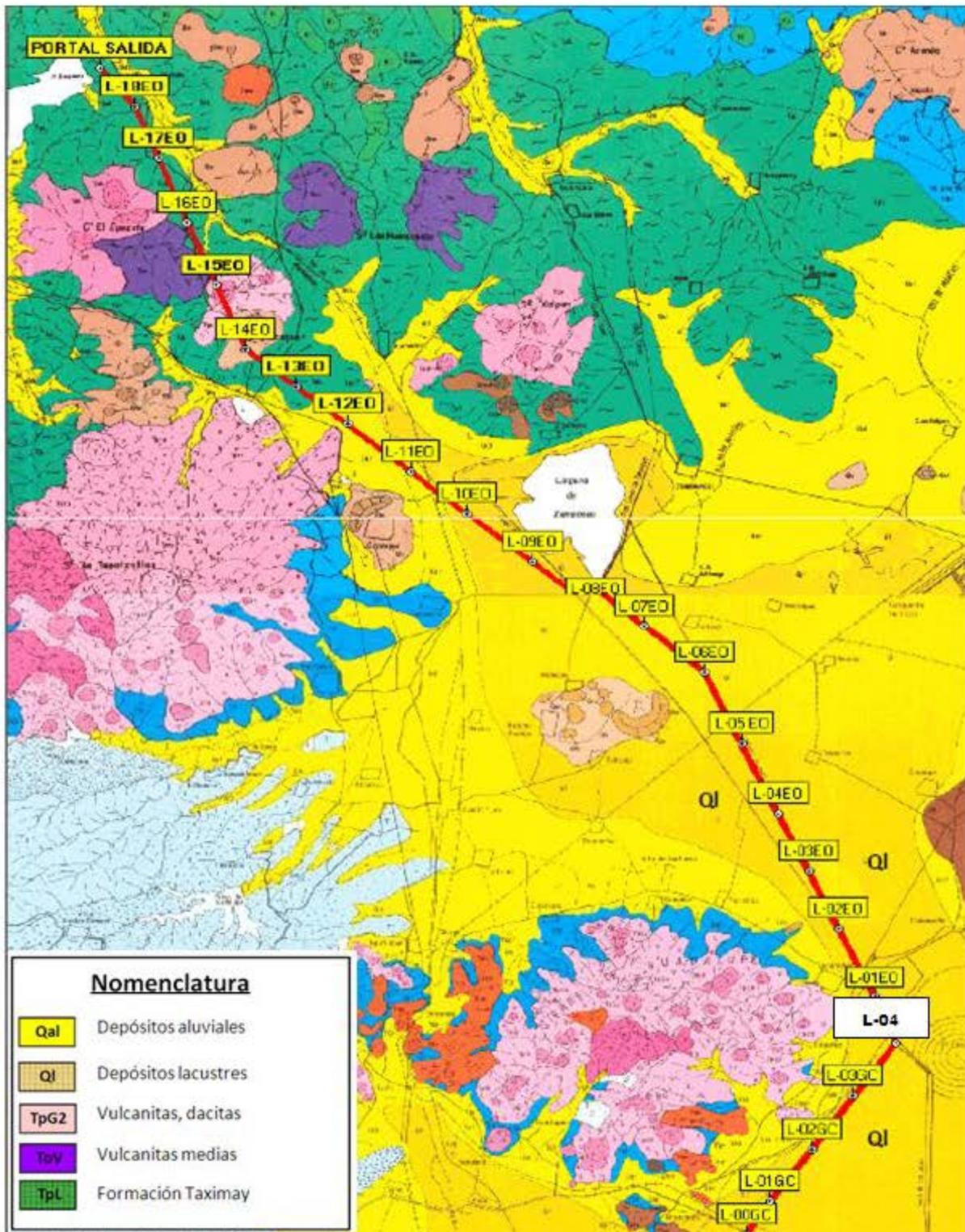


Figura 15.- Interpretación geológica del Dr. Federico Mooser. Se muestra el trazo en elevación del TEO y las diferentes condiciones geológicas que atraviesa, desde las arcillas blandas y limos arenosos al norte del Distrito Federal hasta los abanicos aluviales y lavas con tobas en el norte del Estado de México en su transición con Hidalgo. Se ubican hacia el final del trazo las arcillas lacustres altamente consolidadas (en color verde) de la formación Taximay. La Lumbreira 04 se ubica en el tramo 1 y como puede verse, se construye en arcillas blandas y limos arenosos arcillosos, información que, con la campaña de exploración geotécnica será corroborada y detallada. De alguna manera el perfil geológico nos deja entrever qué características deberá tener el escudo EPB2 (con el cual se construye el túnel en el tramo 1, marcado en rosa) donde el material a excavar son arcillas blandas y limos respecto al escudo MIX3(marcado en verde) por ejemplo, donde es seguro que se encontrará con rocas volcánicas.



*Figura 16.- Interpretación geológica del Dr. Mooser mostrando el trazo del TEO en planta. En la parte baja de la imagen se observa la Sierra de Guadalupe en color rosa mientras que en la parte alta de la imagen, en color verde, se observa la formación Taximay de arcillas consolidadas fracturadas. En lo que respecta a la Lumbreira 04, se construirá en depósitos lacustres (Ql).*

### 3.5. Exploración geotécnica y pruebas de laboratorio

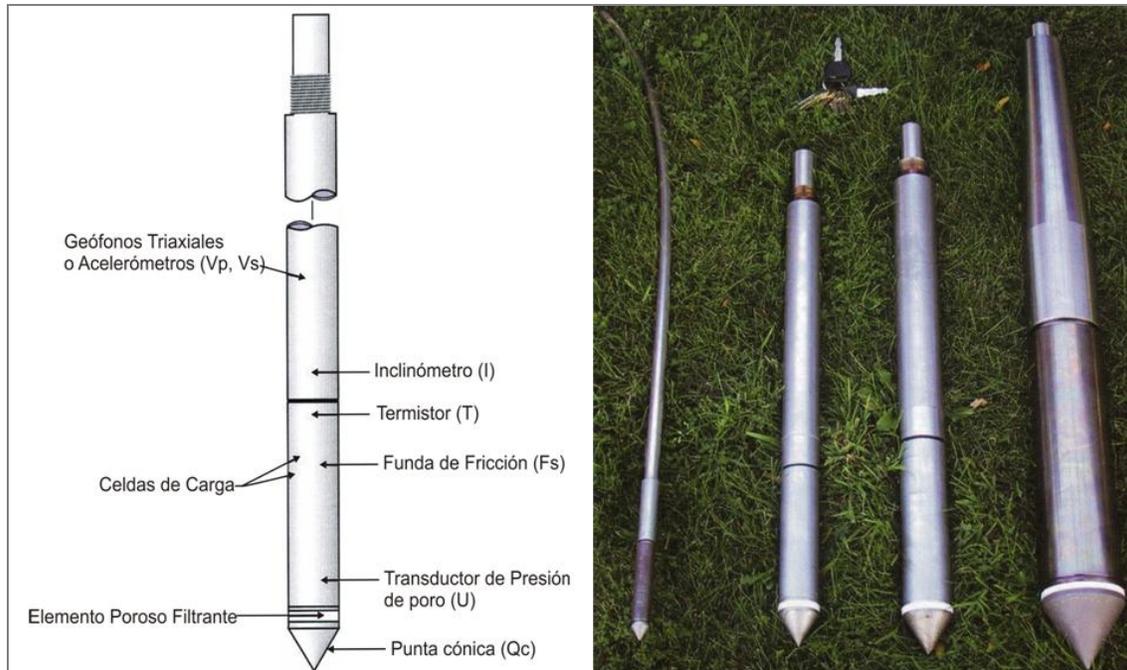
La exploración geotécnica en su etapa de ingeniería básica tiene como principal objetivo el reconocimiento de la estratigrafía a lo largo del trazo del TEO, conocer las condiciones de presión del agua del subsuelo y obtener una aproximación de las propiedades mecánicas de los suelos involucrados. Esta información hace posible el análisis geotécnico preliminar, lo que a su vez permite fundamentar los objetivos de la etapa de muestreo inalterado posterior, llamada campaña de exploración geotécnica complementaria.

Las condiciones de presión del agua se determinaron mediante piezómetros abiertos localizados en los estratos permeables. Los piezómetros neumáticos tienen la limitante de su complejidad en la instalación y operación, sin embargo, pueden operar sin problemas en estratos arcillosos. La posición del nivel de agua freática se determinó mediante tubos de observación.

Después de la ingeniería básica, el principal objetivo de la campaña complementaria será recuperar muestras de suelo con un mínimo de alteración en el acomodo estructural de sus partículas para realizarles posteriormente pruebas confiables de resistencia y deformabilidad en el laboratorio.

En cada lumbrera del TEO se realizaron al menos 2 de los sondeos siguientes:

- A. **Sondeo continuo (SC). Cono eléctrico (ASTM D5778).**- con el sondeo continuo se ejecuta un ensayo de penetración estática mediante la prueba de cono eléctrico. Con él se determinan las variaciones con la profundidad de las resistencias a la penetración de punta y fricción del cono. La interpretación de estos parámetros permite definir con precisión cambios en las condiciones estratigráficas del sitio y estimar la resistencia al corte de los suelos mediante correlaciones empíricas. El cono en sí consiste en una celda de carga con dos unidades sensibles instrumentadas con deformímetros eléctricos. La fuerza que se desarrolla en la punta cónica se mide en la celda inferior y la que se desarrolla en la funda de fricción se mide en la celda superior. La señal de salida del cono se transmite con cables a la superficie, la recibe un aparato receptor que interpreta y transforma en señal digital. Dicho cono se hinca en el suelo empujándolo con barras de acero por medio un sistema hidráulico con el cual es posible controlar la velocidad de penetración, la cual oscila alrededor de los 2cm/s.



**Figura 17.-** Aspecto de un cono eléctrico que además cuenta con medición de presión de poro. A este tipo de cono se le llama piezocono el cual se menciona más adelante en este trabajo. A la izquierda se observa un piezocono equipado con geófonos para mediciones de velocidades de propagación de onda, inclinómetro para medición de pérdida de la verticalidad y un sensor de temperatura (termistor). Como elementos un poco más comunes se encuentran las celdas de carga por punta y fricción, así como el elemento poroso que permite el acceso de agua haciendo posible la medición de la presión de poro (disponible en [www.conetec.com](http://www.conetec.com)). A la derecha se observan diferentes conos eléctricos actualmente utilizados en México para exploración geotécnica, de izquierda a derecha: minicono con 2 cm<sup>2</sup> de área de punta; después el más común de 10 cm<sup>2</sup>; 15 cm<sup>2</sup> y finalmente uno de 40 cm<sup>2</sup>.

**B. Sondeo mixto (SM). Prueba de penetración estándar SPT (ASTM D1586).**- el sondeo mixto consiste en la prueba de penetración estándar más algún tipo de muestreador. La SPT (Standard Penetration Test, por sus siglas en inglés) permite estimar la resistencia al esfuerzo cortante del suelo por medio del número de golpes necesario para hincar el penetrómetro estándar y obtener muestras alteradas para la identificación del suelo. Esta técnica es muy útil en suelos granulares, en los que el muestreo inalterado es complicado; en los suelos cohesivos blandos de la Ciudad de México resulta útil pero poco confiable debido a que las correlaciones con el número de golpes son poco precisas. De esta prueba que en épocas pasadas era aceptada como una prueba absoluta, a fechas recientes su principal ventaja recae en la recuperación de las muestras inalteradas y en su invaluable valor ante los ojos, tacto y olfato del ingeniero en campo y laboratorio. El penetrómetro estándar es un tubo de acero con un extremo afilado que se hinca durante la SPT; dicho tubo conviene esté abierto longitudinalmente para la observación de la muestra. Junto con el penetrómetro estándar se utilizan columnas de barras de acero para profundizar el

penetrómetro y un martinete golpeador de 64 kg y 75 cm de caída. La resistencia a la penetración estándar se define como el número N de golpes para penetrar los 30 cm intermedios del penetrómetro (es decir, una carrera de los 15 a 45 cm); los golpes de los primeros 15 cm se desprecian porque se consideran no representativos por la alteración inducida a causa de la perforación. Dentro de los resultados que podemos obtener del SPT se tienen: muestras alteradas que servirán para identificar los suelos y obtener propiedades índice; perfil estratigráfico preliminar que se corroborará una vez que se tengan los resultados de las pruebas de laboratorio; y finalmente, una aproximación a la resistencia al esfuerzo cortante de los suelos granulares mediante correlaciones con el número de golpes.

- C. **Piezocono (CPTu) (ASTM D5778).**- el piezocono es una variante del sondeo de cono eléctrico la cual incluye un sensor para la evaluación de la presión intersticial generada durante la hinca, así como la evolución de su disipación cuando ésta se detiene, lo que permite caracterizar además la capacidad drenante del terreno.
  
- D. **Sondeo selectivo (SS).**- utilizado en la campaña de exploración geotécnica complementaria, este tipo de sondeo sólo perfora hasta ciertas profundidades específicas, donde, al igual que en el sondeo continuo, se obtienen muestras inalteradas por medio de un muestreador.

En los Sondeos Mixtos y en los Sondeos Selectivos se utilizaron los siguientes muestreadores:

**Tubo Shelby (Tubo de pared delgada, ASTM D1587).**- son tubos abiertos de pared delgada afilados en un extremo con 75 y 90 cm de longitud, y 7.5 y 10 cm de diámetro, que permiten obtener muestras llamadas inalteradas aunque en realidad sus partículas sufren un mínimo nivel de perturbación. Ideal en suelos blandos como las arcillas y limos saturados del TEO.

**Tubo dentado.**- este tubo permite obtener muestras de arcillas duras y limos compactos o cementados con un mínimo de alteración. Es una herramienta intermedia entre los tubos Shelby y el Barril Denison. Lo constituye un tubo de acero, unido en su extremo superior con la cabeza muestreadora que a su vez, va montada al final de la columna de barras de perforación con las que se hinca y da rotación al muestreador desde superficie. La parte inferior del tubo tiene ocho dientes de corte dispuestos simétricamente que miden de 0.8 a 1.0 cm de altura y 3.0 cm de base. La sierra se forma con alternaciones de un diente recto y uno doblado 0.2 cm hacia el exterior. El diámetro del tubo debe ser de 10 cm y su longitud de 100 cm.

**Barril Denison.**- es un muestreador que consiste en dos tubos concéntricos, uno interior que penetra en el suelo a presión y rescata la muestra mientras que el exterior, con la broca en su extremo, gira y corta el suelo circundante. Dicho muestreador, al operar a rotación y presión, permite obtener especímenes de arcillas duras, limos compactos o cementados con pocas gravas localizados abajo del nivel freático que pudieran corresponder a lentes duros, por ejemplo. Los diámetros utilizados fueron NX y NQ.

Para el caso específico de la Lumbrera 04, se realizaron dos sondeos mixtos, el SM-26 y el SM-27 (correspondientes a la exploración complementaria de COMISSA) a una profundidad de 56.0 m utilizando como técnica de exploración, en el caso del SM-26, el cono eléctrico en suelos blandos y la prueba de penetración estándar en suelos duros; por su parte, para el SM-27 se llevaron a cabo recuperaciones selectivas de muestras inalteradas con tubo Shelby o con tubo dentado (sondeo selectivo, SS).

Posterior a la exploración, viene la compleja tarea de laboratorio. La logística que acompaña a exploración geotécnica no se limita al campo sino también al laboratorio donde se reciben grandes cantidades de muestras que, debidamente recolectadas, identificadas, transportadas, procuradas y almacenadas de acuerdo a normatividad y recomendaciones, deben ahora ser ensayadas con el máximo cuidado posible, teniendo en cuenta que un pequeño error en el ensaye o en el manejo de la muestra se reflejará, con un inevitable efecto dominó, en las etapas subsecuentes del proceso hasta afectar el diseño geotécnico. Los resultados de las pruebas de laboratorio permitieron corroborar los materiales probados y definir propiedades como la resistencia al esfuerzo cortante en condiciones no drenadas ( $S_u$ ), ángulo de fricción ( $\phi$ ), módulo de elasticidad ( $E$ ) y peso volumétrico ( $\gamma$ ).

Las muestras obtenidas en la prueba SPT (muestras alteradas) y las muestras inalteradas del SS, se ensayaron en laboratorio para determinar las siguientes propiedades índice:

- a. Clasificación visual y al tacto según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, SUCS
- b. Contenido natural de agua,  $w$  (%)
- c. Límites de Atterberg (líquido LL, y plástico LP)
- d. Porcentaje de finos  $F$  (%) (material que pasa la malla No. 200)

En cuanto a los ensayos en laboratorio, para las muestras inalteradas del SM-27 se realizaron las siguientes pruebas:

- a. Compresión simple,  $q_u$
- b. Compresión triaxial no consolidada no drenada, TX UU
- c. Determinación del peso volumétrico natural,  $\gamma$

- d. Densidad de sólidos,  $S_s$

*Algunas consideraciones sobre las pruebas realizadas*

- a. Para el caso de la prueba de compresión simple, se realizaron dos ensayos para una misma profundidad excepto en aquellas donde no se contaba con material suficiente. Para las profundidades con dos ensayos, se eligió el valor mínimo.
- b. En las aproximaciones al modelo geotécnico y en el modelo en sí mismo se reporta la relación  $c = qu/2$
- c. En el caso de las pruebas TX UU los parámetros de cohesión y ángulo de fricción se definieron a partir de la envolvente de falla de los ensayos realizados.
- d. El número de golpes  $N$ , y el contenido de agua  $w\%$ , se indican como un promedio de los valores reportados en el sondeo realizado por COMISSA siempre y cuando no haya gran dispersión entre ellos, de lo contrario se indica como un intervalo indicando el máximo y mínimo.
- e. El módulo de elasticidad es calculado a partir de la fórmula de Young  $E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$  donde el módulo de elasticidad es proporcional a la tensión y deformación ( $\sigma$ =fuerza/área,  $\varepsilon$ =deformación). El área de la probeta es medida antes del inicio de la prueba, la fuerza y la deformación son medidas durante el ensaye. El valor reportado en el modelo es un módulo triaxial elastoplástico correspondiente al de la curva esfuerzo-deformación aproximadamente al 50% del esfuerzo de falla.
- f. Para estimar los valores de la relación de Poisson se recurrió a valores recomendados en la literatura tomando en cuenta además, que para materiales parcialmente saturados los valores de  $\nu$  son menores que para materiales saturados (Tablas 2 y 3).

| Tipo de suelo             | Módulo de Elasticidad, $E_s$ (MPa) | Relación de Poisson, $\nu$ |
|---------------------------|------------------------------------|----------------------------|
| Arena suelta              | 10 - 25                            | 0.20 - 0.40                |
| Arena de compacidad media | 15 - 30                            | 0.25 - 0.40                |
| Arena densa               | 35 - 55                            | 0.30 - 0.40                |
| Arena limosa              | 10 - 20                            | 0.20 - 0.40                |
| Arena y grava             | 70 - 170                           | 0.15 - 0.35                |
| Arcilla blanda            | 4 - 20                             |                            |
| Arcilla media             | 20 - 40                            | 0.20 - 0.50                |
| Arcilla dura              | 40 - 100                           |                            |

**Tabla 2.- Valores típicos para el módulo de elasticidad y relación de Poisson en función del tipo de suelo utilizados en el modelo geotécnico**

| Tipo de suelo       | $\nu$      |
|---------------------|------------|
| Arcilla saturada    | 0.4 - 0.5  |
| Arcilla sin saturar | 0.1 - 0.3  |
| Arcilla arenosa     | 0.2 - 0.3  |
| Limo                | 0.3 - 0.35 |
| Arena               | 0.2 - 0.4  |
| Gruesa              | 0.15       |
| Fina                | 0.25       |
| Roca                | 0.1-0.4    |
| Loess               | 0.1-0.3    |
| Hielo               | 0.36       |
| Concreto            | 0.15       |

**Tabla 3.- Valores recomendados para la relación de Poisson dependiendo el tipo de suelo**

- g. Para estimar rangos de valores del coeficiente de empuje en reposo,  $K_0$ , se toma como referencia la expresión de Jaki  $K_0 = 1 - \sin \phi$  donde  $K_0$  depende del ángulo de fricción interna del suelo. Para el caso de suelos donde la resistencia está determinada predominantemente por la cohesión, se recurrió a la relación que existe entre el  $K_0$  y la relación de Poisson  $K_0 = \nu / (1 - \nu)$ .

Para el caso de la piezometría se utilizaron datos de enero del 2009 donde, en la etapa de ingeniería básica, la CFE instaló una estación piezométrica compuesta por 4 piezómetros abiertos del tipo Casagrande.

También se instaló un tubo de observación a 7.30 m de profundidad, mismo que se reportó seco en enero de 2009.

A continuación se presentan, a manera de resumen, los resultados de las pruebas de laboratorio hechas para la L-04 en sus sondeos SM-26 y SM-27:

| SM-26      |            |                 |           |        |        |        |        |
|------------|------------|-----------------|-----------|--------|--------|--------|--------|
| Prof.i (m) | Prof.f (m) | Prof. media (m) | Finos (%) | w (%)  | LL (%) | LP (%) | IP (%) |
| 14.30      | 14.90      | 14.60           | -         | 47.12  | 54.90  | 39.16  | 15.74  |
| 15.50      | 16.10      | 15.80           |           | 23.00  | 73.80  | 55.76  | 18.04  |
| 16.70      | 17.30      | 17.00           |           | 314.00 | 291.00 | 143.07 | 147.93 |
| 19.20      | 19.80      | 19.50           | 77.10     | 39.50  | 37.20  | 25.74  | 11.46  |
| 25.10      | 25.70      | 25.40           | -         | 151.79 | 155.80 | 67.96  | 87.84  |
| 30.30      | 30.70      | 30.50           | 95.20     | 43.13  | 57.40  | 40.82  | 16.58  |
| 33.90      | 34.50      | 34.20           | 96.80     | 93.54  | 104.90 | 66.63  | 38.27  |
| 38.10      | 38.75      | 38.43           | -         | 181.50 | 197.20 | 83.64  | 113.56 |
| 41.70      | 42.30      | 42.00           |           | 69.65  | 98.80  | 60.77  | 38.03  |
| 45.90      | 46.10      | 46.00           | 94.60     | 33.48  | 42.20  | 29.56  | 12.64  |
| 48.80      | 49.50      | 49.15           | 78.50     | 34.00  | 37.60  | 26.72  | 10.88  |
| 50.10      | 50.36      | 50.23           | 41.60     | 26.31  | 37.10  | 28.33  | 8.77   |
| 52.50      | 52.76      | 52.63           | 39.70     | 33.11  | 39.80  | 28.24  | 11.56  |
| 55.50      | 55.72      | 55.61           | 26.10     | 27.53  | 34.20  | 25.71  | 8.49   |

**Tabla 4.- Propiedades índice del SM-26 provenientes de muestras alteradas**

| SM-27         |                |                       |                                       |             |                            |              |        |        |        |        |   |  |                           |                          |                      |
|---------------|----------------|-----------------------|---------------------------------------|-------------|----------------------------|--------------|--------|--------|--------|--------|---|--|---------------------------|--------------------------|----------------------|
| Prof.i<br>(m) | Prof.<br>f (m) | Prof.<br>media<br>(m) | $\gamma_{qu}$<br>(kN/m <sup>3</sup> ) | qu<br>(kPa) | E <sub>50qu</sub><br>(kPa) | Finos<br>(%) | w (%)  | LL (%) | LP (%) | IP (%) | $\gamma_{TXUU}$<br>(kN/m <sup>3</sup> ) | $\sigma_{3i}$<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | E <sub>50i</sub><br>(kPa) | $\sigma_{TXUU}$<br>(kPa) | $\phi_{TXUU}$<br>(°) |
| 1.70          | 1.90           | 1.80                  | -                                     |             |                            | 96.80        | 111.33 | 181.60 | 142.85 | 38.75  | -                                       |  |                           |                          |                      |
| 2.30          | 2.50           | 2.40                  |                                       |             |                            | 93.50        | 185.00 | 263.00 | 78.99  | 184.01 |   |  |                           |                          |                      |
| 4.70          | 4.90           | 4.80                  | 11.75                                 | 75.54       | 3237.30                    | 98.10        | 348.42 | 337.00 | 103.54 | 233.46 | 11.52                                   | 0.30                                   | 3933.81                   | 39.24                    | 0.00                 |
|               |                |                       |                                       |             |                            |              |        |        |        |        | 11.62                                   | 0.50                                   | 3678.75                   |                          |                      |
|               |                |                       |                                       |             |                            |              |        |        |        |        | 11.73                                   | 0.70                                   | 4512.60                   |                          |                      |
| 4.70          | 4.90           | 4.80                  | 11.19                                 | 49.05       | 3335.40                    | 98.10        | 348.42 | 337.00 | 103.54 | 233.46 | -                                       |  |                           |                          |                      |
| 7.30          | 7.50           | 7.40                  | 11.72                                 | 65.73       | 6180.30                    | 88.10        | 334.07 | 429.00 | 121.28 | 307.72 | 11.04                                   | 0.60                                   | 7848.00                   | 31.39                    | 0.00                 |
|               |                |                       |                                       |             |                            |              |        |        |        |        | 11.39                                   | 0.80                                   | 6474.60                   |                          |                      |
|               |                |                       |                                       |             |                            |              |        |        |        |        | 11.08                                   | 1.00                                   | 6082.20                   |                          |                      |
| 7.30          | 7.50           | 7.40                  | 11.21                                 | 40.22       | 5003.10                    | 88.10        | 334.07 | 429.00 | 121.28 | 307.72 | -                                       |  |                           |                          |                      |
| 12.10         | 12.30          | 12.20                 | 11.60                                 | 40.22       | 4218.30                    | 91.00        | 249.45 | 281.00 | 88.44  | 192.56 | 11.76                                   | 1.20                                   | 5297.40                   | 34.34                    | 0.00                 |
|               |                |                       |                                       |             |                            |              |        |        |        |        | 11.88                                   | 1.60                                   | 8240.40                   |                          |                      |
|               |                |                       |                                       |             |                            |              |        |        |        |        | 11.78                                   | 2.00                                   | 8829.00                   |                          |                      |
| 12.10         | 12.30          | 12.20                 | 11.43                                 | 65.73       | 5591.70                    | 91.00        | 249.45 | 281.00 | 88.44  | 192.56 | -                                       |  |                           |                          |                      |
| 17.50         | 17.70          | 17.60                 | 12.45                                 | 49.05       | 2354.40                    | 99.50        | 222.50 | 252.00 | 102.35 | 149.65 | 12.38                                   | 1.40                                   | 2943.00                   | 39.24                    | 0.00                 |
|               |                |                       |                                       |             |                            |              |        |        |        |        | 12.27                                   | 1.70                                   | 3139.20                   |                          |                      |
|               |                |                       |                                       |             |                            |              |        |        |        |        | 12.20                                   | 2.00                                   | 3139.20                   |                          |                      |
| 19.98         | 20.18          | 20.08                 | -                                     | -           | -                          | 92.40        | 54.39  | 30.15  | 26.65  | 3.50   | 14.65                                   | 2.00                                   | 23445.90                  | 127.53                   | 25.00                |
|               |                |                       |                                       |             |                            |              |        |        |        |        | 15.12                                   | 2.40                                   | 20404.80                  |                          |                      |
| 22.90         | 23.10          | 23.00                 | 12.70                                 | 204.05      | 7651.80                    | -            | 149.53 | 201.00 | 68.75  | 132.25 | 12.65                                   | 1.80                                   | 12556.80                  | 107.91                   | 0.00                 |
|               |                |                       |                                       |             |                            |              |        |        |        |        | 12.65                                   | 2.20                                   | 10104.30                  |                          |                      |
|               |                |                       |                                       |             |                            |              |        |        |        |        | 12.68                                   | 2.60                                   | 12262.50                  |                          |                      |

Tabla 5.- Propiedades índice y mecánicas obtenidas de muestras inalteradas del SM-27 (1/2)

| SM-27         |               |                       |                                       |             |                            |              |        |        |           |        |   |  |                           |                     |                      |
|---------------|---------------|-----------------------|---------------------------------------|-------------|----------------------------|--------------|--------|--------|-----------|--------|---|--|---------------------------|---------------------|----------------------|
| Prof.i<br>(m) | Prof.f<br>(m) | Prof.<br>media<br>(m) | $\gamma_{qu}$<br>(kN/m <sup>3</sup> ) | qu<br>(kPa) | E <sub>50qu</sub><br>(kPa) | Finos<br>(%) | w (%)  | LL (%) | LP<br>(%) | IP (%) | $\gamma_{TXUU}$<br>(kN/m <sup>3</sup> ) | $\sigma_{3i}$<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | E <sub>50i</sub><br>(kPa) | $c_{TXUU}$<br>(kPa) | $\phi_{TXUU}$<br>(°) |
| 28.32         | 28.52         | 28.42                 | 13.53                                 | 280.57      | 10889.10                   | 99.80        | 127.44 | 140.40 | 48.88     | 91.52  | 13.56                                   | 1.80                                   | 12262.50                  | 110.85              | 0.00                 |
|               |               |                       |                                       |             |                            |              |        |        |           |        | 12.89                                   | 2.20                                   | 14420.70                  |                     |                      |
|               |               |                       |                                       |             |                            |              |        |        |           |        | 13.27                                   | 2.60                                   | 13734.00                  |                     |                      |
| 32.00         | 32.20         | 32.10                 | -                                     | -           | -                          | 96.70        | 127.19 | 100.00 | 48.47     | 51.53  | 14.34                                   | 3.00                                   | 18835.20                  | 326.67              | 0.00                 |
|               |               |                       |                                       |             |                            |              |        |        |           |        | 14.76                                   | 4.00                                   | 19423.80                  |                     |                      |
|               |               |                       |                                       |             |                            |              |        |        |           |        | 14.33                                   | 5.00                                   | 12262.50                  |                     |                      |
| 36.00         | 36.25         | 36.13                 | 12.52                                 | 362.97      | 12556.80                   | 97.40        | 130.62 | 220.50 | 115.13    | 105.37 | 12.68                                   | 3.20                                   | 24328.80                  | 264.87              | 0.00                 |
|               |               |                       |                                       |             |                            |              |        |        |           |        | 12.63                                   | 3.60                                   | 19031.40                  |                     |                      |
|               |               |                       |                                       |             |                            |              |        |        |           |        | 12.77                                   | 4.00                                   | 24034.50                  |                     |                      |
| 39.33         | 39.53         | 39.43                 | 12.70                                 | 389.46      | 11772.00                   | 99.70        | 154.72 | 200.50 | 87.74     | 112.76 | 12.65                                   | 3.50                                   | 21680.10                  | 169.71              | 0.00                 |
|               |               |                       |                                       |             |                            |              |        |        |           |        | 12.58                                   | 4.00                                   | 17952.30                  |                     |                      |
|               |               |                       |                                       |             |                            |              |        |        |           |        | 12.66                                   | 4.50                                   | 12654.90                  |                     |                      |
| 42.53         | 42.73         | 42.63                 | -                                     | -           | -                          | 79.60        | 55.85  | 79.00  | 40.60     | 38.40  | 16.82                                   | 4.00                                   | 20699.10                  | 365.91              | 0.00                 |
|               |               |                       |                                       |             |                            |              |        |        |           |        | 16.30                                   | 5.00                                   | 29724.30                  |                     |                      |
|               |               |                       |                                       |             |                            |              |        |        |           |        | 16.64                                   | 6.00                                   | 30312.90                  |                     |                      |
| 53.70         | 53.90         | 53.80                 | 19.39                                 | 42.18       | 3433.50                    | 39.90        | 31.82  |        |           | -      | 18.00                                   | 4.00                                   | 8240.40                   | 0.00                | 20.00                |
|               |               |                       |                                       |             |                            |              |        |        |           |        | 18.54                                   | 5.00                                   | 8338.50                   |                     |                      |
|               |               |                       |                                       |             |                            |              |        |        |           |        | 18.37                                   | 6.00                                   | 9123.30                   |                     |                      |

Tabla 6.- Propiedades índice y mecánicas obtenidas de muestras inalteradas del SM-27 (2/2)

### **3.6. Perfiles estratigráficos y modelo geotécnico**

Los datos de la exploración se presentan en el siguiente perfil estratigráfico, mismo que se muestra como una propuesta definitiva para elaborar el Modelo Geotécnico.





La interpretación de los datos que arroja el laboratorio es responsabilidad del ingeniero de diseño que, una vez que se le entrega toda la información, deberá generar el llamado Modelo Geotécnico, mismo que deberá verificarse y en su caso ajustarse conforme se realicen los análisis con modelos numéricos y se comparen resultados con la instrumentación instalada.

El citado modelo es una tabla en donde prácticamente se resume toda la campaña de exploración geotécnica, en la cual por medio de unidades estratigráficas se tratan de escoger algunos estratos continuos con ciertas características comunes. Dichas características deben ser analizadas para agrupar correctamente los estratos que se lograron distinguir en la campaña de exploración dentro de "estratos" más grandes, denominados precisamente unidades estratigráficas. A estas unidades se asignan por columnas, con base en la información de los estratos que contiene, varias características y propiedades dentro de las que destacan por su alta utilidad:

- a. Una identificación de cada unidad que resulte familiar para quien genera el modelo y para quien pudiera llegar a usarlo. Por ejemplo, "U<sub>1</sub>", "Unidad A", "Unidad 1" etc.
- b. Una clasificación de acuerdo al Sistema Universal de Clasificación de Suelos (SUCS). Si se llegara a encontrar roca en la exploración convendría colocar un nombre (por ejemplo, "basalto vesicular" o "boleos") y convendría también colocar alguna referencia para clasificar dicha roca como por ejemplo su Rock Quality Designation (RQD%) de Deere y Reyes.
- c. Descripción del material.
- d. Profundidad inicial y final de cada unidad estratigráfica.
- e. Espesor.
- f. Profundidad media.
- g. Peso volumétrico.
- h. Cohesión (en función del tipo de suelo).
- i. Ángulo de fricción interna (en función del tipo de suelo).
- j. Relación de Poisson.
- k. Módulo de elasticidad.

La generación del Modelo Geotécnico reviste una responsabilidad importante ya que es mediante el conocimiento de la exploración geotécnica y también de la experiencia como se pueden discriminar algunos datos, hacer las agrupaciones y determinar dónde empieza y termina cada unidad, lo cual conlleva, por su propia naturaleza, cierta subjetividad al no haber criterios establecidos. El Modelo Geotécnico generado será entonces un documento común a todos los cálculos geotécnicos realizados para el proyecto. De ahí la importancia que esté listo tan pronto llegue la información de los ensayos de laboratorio para que a la brevedad esté disponible para cualquier cálculo necesario.

Para la generación del Modelo Geotécnico de la Lumbreira 04 se propone partir del siguiente resumen:

- A. Costra superficial. De 0 a 1.40 m de profundidad se encuentra una arcilla limosa de color café, con resistencia a la penetración del cono eléctrico que varía de 500 a 5 000 kPa.
- B. Arcilla. De 1.40 a 14.30 m se trata de arcilla de alta plasticidad, CH de acuerdo al SUCS, de consistencia blanda con resistencia a la penetración del cono eléctrico entre 250 y 600 kPa, contenido natural de agua entre 100 y 350%; tres muestras a 4.80, 7.40 y 12.20 m de profundidad arrojaron resistencias a la compresión simple, respectivamente, 75, 65 y 65 kPa. En compresión triaxial se obtuvieron cohesiones y ángulos de fricción interna de 39 kPa y 0°, 31 kPa y 0°, 34 kPa y 0°.
- C. Intercalaciones de limo y limo arenoso. De 14.30 a 21.60 m se encuentra limo de baja y alta plasticidad, de clasificación ML y MH de acuerdo al SUCS, de consistencia blanda a media, en el que la prueba de penetración estándar SPT toma valores entre 2 y 75 golpes y el contenido natural de agua alrededor del 220%; se ensayó una muestra a 17.60 m de profundidad teniendo una compresión simple de 50 kPa; otra muestra también a 17.60 m y una más a 20.08 m de profundidad se ensayaron a compresión triaxial y se obtuvieron valores de cohesión y de ángulo de fricción de 40 kPa y 0°, 128 kPa y 25°, respectivamente. El piezómetro PZA-L4D instalado en este estrato se reporta seco.
- D. Intercalaciones de arcilla y limo. De 21.60 a 30.30 m de profundidad se tienen intercalaciones de limo y arcilla, de alta plasticidad, de clasificación CH y MH de acuerdo al SUCS, de consistencia media a firme, en donde la resistencia a la penetración de cono eléctrico varía entre 750 y 1500 kPa y el contenido natural de agua entre 120 y 150%; se ensayaron dos muestras a 23.00 y 28.42 m de profundidad, sometidas a laboratorio arrojaron resistencias a compresión simple de 204 y 280 kPa; en compresión triaxial se obtuvieron cohesiones y ángulos de fricción interna de 108 kPa y 0° y de 111 kPa y 0°. El piezómetro PZA-L4C instalado en este estrato a 25.02 m reporta una presión de poro de 136.97 kPa.
- E. Limos. De 30.30 a 42.90 m de profundidad se localizan limos de alta plasticidad, en ocasiones arenosos de clasificación MH de consistencia media a dura, donde se identifican dos subunidades:
  - Limo plástico con 7.80 m de espesor (profundidad de 30.30 a 38.10 m) con número de golpes de SPT desde 14 hasta más de 50 golpes para menos de 13 cm de

avance. El contenido natural de agua varía alrededor de 130%; se ensayó a compresión simple una muestra de 36.13 m de profundidad arrojando una resistencia de 363 kPa; otra muestra también a 36.13 m de profundidad se ensayó en compresión triaxial obteniéndose valores de cohesión y ángulo de fricción interna de 265 kPa y  $0^\circ$  respectivamente. El piezómetro PZL4-B instalado a 33.41 m de profundidad se reporta seco.

- Limo y limo arenoso. Tiene 4.80 m de espesor, va de 38.10 a 42.90 m de profundidad. De consistencia media a dura, con número de golpes de SPT entre 6 y 30, tiene un contenido de agua de 56 a 155%: se ensayó una muestra de 39.43 m de profundidad a compresión simple arrojando una resistencia de 390 kPa; por otro lado, otra muestra a 39.43 m y una más a 42.63 m de profundidad se ensayaron en compresión triaxial obteniéndose valores de cohesión y de ángulo de fricción interna de 170 kPa y  $0^\circ$ , y 366 kPa y  $0^\circ$  respectivamente.

- E. Limo y arena compacta. Va de 42.90 a 56.10 m de profundidad; son intercalaciones de limos de consistencia muy dura y arenas muy compactas donde la SPT arroja más de 50 golpes. Se ensayó una muestra a compresión simple a 53.80 m de profundidad arrojando una resistencia de 42.18 kPa. También se tomó una muestra a esa profundidad para ensayarla a compresión triaxial arrojando valores de cohesión y de ángulo de fricción interna de 0.0 kPa y  $20^\circ$ , respectivamente. De acuerdo a resultados de CFE en la etapa de ingeniería básica, una muestra de 54.75 m de profundidad ensayada a compresión simple obtuvo una resistencia de 1026 kPa en tanto que una muestra de 54.25 m de profundidad sometida a compresión triaxial arrojó una cohesión de 320 kPa y un ángulo de fricción interna de  $30^\circ$ . El piezómetro instalado PZA-L4A a 52.38 m de profundidad, se reporta seco.

Así entonces se muestra el Modelo Geotécnico en forma tabular:

| Modelo Geotécnico Lumbrera 04 |                |                 |             | 5.48  | m     | NAF  |   | 30                | kPa                            | Sobrecarga                 |                          |       |
|-------------------------------|----------------|-----------------|-------------|---|-------|------|---|-------------------|--------------------------------|----------------------------|--------------------------|-------|
| Unidad                        | Prof. (m)      | Prof. media (m) | Espesor (m) | Descripción   | SUCS  | w(%) | Peso volumétrico, $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> ) | Cohesión, c (kPa) | Ángulo de fricción, $\phi$ (°) | Relación de Poisson, $\nu$ | Módulo de Young, E (kPa) | $K_0$ |
| A                             | 0.00<br>1.40   | 0.70            | 1.40        | Costra superficial formada por arcilla limosa, café claro de consistencia muy firme con arena     | CL    | 58   | 15.00   | 80.00             | 10                             | 0.40                       | 8000                     | 0.70  |
| B                             | 1.40<br>14.30  | 7.85            | 12.90       | Arcilla de consistencia blanda y alta plasticidad con presencia de materia orgánica               | CH    | 200  | 12.10   | 32.80             | 0                              | 0.40                       | 6850                     | 0.70  |
| C1                            | 14.30<br>16.30 | 15.30           | 2.00        | Limo arcilloso de consistencia muy dura con intercalaciones de arcilla de consistencia muy blanda | ML    | 50   | 11.80   | 40.50             | 0                              | 0.35                       | 10340                    | 0.70  |
| C2                            | 16.30<br>18.20 | 17.25           | 1.90        | Arcilla de consistencia muy blanda color gris verdoso, con grumos del mismo material              | CH    | 200  | 12.80   | 45.80             | 0                              | 0.40                       | 3130                     | 0.70  |
| C3                            | 18.20<br>21.60 | 19.90           | 3.40        | Limo arenoso gris verdoso de consistencia muy dura y arena volcánica altamente compacta           | ML    | 40   | 17.00   | 36.20             | 34                             | 0.40                       | 18440                    | 0.44  |
| D                             | 21.60<br>30.30 | 25.95           | 8.70        | Intercalaciones de limo de consistencia muy firme y arcilla de consistencia blanda a media        | CH-ML | 130  | 14.30   | 113.50            | 0                              | 0.35                       | 9900                     | 0.70  |
| F1                            | 30.30<br>38.10 | 34.20           | 7.80        | Limo arenoso de consistencia dura y arena limosa muy compacta                                     | ML    | 75   | 14.00   | 200.60            | 6                              | 0.35                       | 20320                    | 0.70  |
| F2                            | 38.10<br>42.90 | 40.50           | 4.80        | Arcilla de alta plasticidad de consistencia firme y poco compresible                              | CH    | 100  | 14.10   | 138.70            | 9                              | 0.35                       | 20020                    | 0.70  |
| G1                            | 42.90<br>50.10 | 46.50           | 7.20        | Intercalaciones de limo y limo arenoso de consistencia muy dura                                   | MH-ML | 15   | 16.40   | 172.00            | 0                              | 0.30                       | 23330                    | 0.70  |
| G2                            | 50.10<br>57.00 | 53.55           | 6.90        | Limo arenoso cementado de consistencia muy dura   | ML    | 15   | 18.20   | 355.50            | 20                             | 0.30                       | 128340                   | 0.66  |

**Tabla 7.- Modelo Geotécnico utilizado para la Lumbrera 04**

### 3.7. Procedimiento constructivo

La solución constructiva está determinada por las condiciones geotécnicas de cada sitio para que el revestimiento de la lumbrera cumpla las funciones de elemento de soporte y de control de filtraciones. Así, el procedimiento de construcción debe satisfacer criterios de estabilidad general y local, basados en la caracterización estratigráfica y las presiones piezométricas del sitio aunque también se debe considerar la capacidad del equipo de excavación que se encuentre disponible.

La totalidad de las lumbreras del TEO están siendo construidas bajo alguno de los 3 procedimientos siguientes: a) muro Milán, b) concreto lanzado, c) solución mixta (muro Milán y concreto lanzado).

Existen lumbreras como la Lo<sub>4</sub> que fueron proyectadas con un solo cuerpo formado por muro Milán mientras que otras se resolvieron mediante dos cuerpos cilíndricos concéntricos telescópicos para alcanzar las profundidades máximas de excavación. En el caso de la solución mixta, en la primera etapa se construye el muro Milán perimetral como estructura de retención de manera que se tenga un empotramiento mínimo de dos metros en suelos arenosos compactos, o bien, se profundice un metro por debajo de la frontera inferior de los estratos permeables cercanos del fondo, es decir, que cumpla con las funciones de estabilidad y control de filtraciones. A modo de ejemplo, en algunas lumbreras como en la L<sub>20</sub>, el muro Milán de la primera etapa llega hasta 120.0 m de profundidad. En la segunda etapa, previamente se instala un elemento estructural de estabilización que sustituya el confinamiento del suelo frente al muro; la excavación continúa con ciclos de avance de un máximo de 3.0 m estabilizados mediante concreto lanzado, reforzado con fibras metálicas y con anclas equidistantes que soporten el revestimiento, distribuidas radialmente, así como la instalación de anillos de estabilización. También en suelos medianamente compactos profundos se prevé un sistema complementario de estabilización a base de tubos verticales perimetrales que se extienden hasta 3.0 m por debajo del nivel máximo de excavación. Existen características particulares para cada lumbrera, como el caso de la L<sub>17</sub> donde se puede excavar la totalidad usando únicamente concreto lanzado como estabilización. Durante la construcción de todas las lumbreras es necesario un sistema adicional para el control de filtraciones al interior de la excavación.

#### *Lumbrera o<sub>4</sub> del TEO*

##### **A. Trabajos previos**

- a. Construcción de una plataforma de trabajo plana y competente para el correcto soporte de los equipos de excavación, maniobras de colocación de armados y colado de concreto.

- b. Pruebas de concreto en planta para verificar la correcta operación y diseño de la mezcla, usando agregados de la región.
- c. Instalación de la planta de lodo bentonítico y el sistema de tuberías.
- d. Preparación del patio de habilitado del acero de refuerzo.
- e. Instalación de oficinas y áreas de servicios.

#### **B. Construcción de brocales**

- a. El brocal interior y el brocal exterior para la construcción del muro Milán son elementos estructurales usados como guía para la excavación anular y la construcción del muro, tienen una separación igual al espesor del muro Milán más una holgura comprendida entre 3 y 5 cm; también funcionan como elementos de soporte de los armados durante la etapa de colado. Su construcción se inicia con el trazo y nivelación del terreno natural en toda el área de la lumbrera, incluyendo la zona del alero del brocal exterior que sí es definitivo, contrario al brocal interior que, una vez que se inicia la excavación del núcleo central, se demuele. Los datos de trazo y nivelación obtenidos serán la base para el cálculo de los volúmenes de excavación. Una vez realizado el trazo del brocal se procede a excavar bajo el nivel de desplante de los aleros del brocal y posteriormente se excava la zanja perimetral que alojará el faldón del mismo. Se considera que la altura de la zanja para la construcción de brocales sea de 1.5 m.
- b. Posterior a la excavación se procede a la colocación del acero de refuerzo previamente habilitado, tanto en aleros como faldones del brocal, cuidando se coloquen los separadores para asegurar los recubrimientos especificados y las placas embebidas de acero para el arriostamiento posterior de las vigas de acero que forman las juntas de los tableros de muro Milán. Se coloca la cimbra común para el colado del brocal y se verifica su alineamiento. Se realiza la colocación de concreto hidráulico contra terreno de clase I estructural de  $f'c=350 \text{ kg/cm}^2$ , revenimiento de  $14 \text{ cm} \pm 2\text{cm}$ , cuidando que el acomodo del concreto se realice adecuadamente con el vibrado necesario. La cimbra podrá retirarse una vez que el concreto pueda soportarse por sí mismo y la construcción de la etapa siguiente podrá hacerse inmediatamente.

#### **C. Excavación de tableros de muro Milán**

- a. Sobre el brocal de concreto ya terminado, se realiza la numeración de tableros con la finalidad de llevar el control del avance, así como para realizar la planeación del ataque de los mismos. La excavación de los tableros se hace en modo alterno, no consecutivo.

- b. Deberá disponerse de suficiente reserva de lodos bentoníticos preparados e hidratados con 24 horas de anticipación como mínimo, fabricados mediante una planta con mezclador de tipo coloidal que genere lodos con la misma calidad, con una densidad entre 1.07 y 1.15 t/m<sup>3</sup> así como un contenido de arena no mayor a 5%. Deberá contarse en la obra con un laboratorio que controle la calidad, densidad y viscosidad de los lodos bentoníticos, así como con un desarenador para su limpieza en caso de que se requiera la reutilización de los mismos.
- c. El muro Milán se construye mediante la realización de la cantidad de tableros previamente definida en proyecto. La longitud en planta de cada tablero será de 2.6 a 2.8 m, que normalmente consiste en una o 2 veces el ancho de la almeja del equipo de excavación. Dicho equipo de excavación consiste en una cuchara de almeja bivalva accionada mecánica o hidráulicamente guiada por kelly telescópico, de características adecuadas al terreno por excavar. Se instalará sobre una grúa de suficiente capacidad. El material recortado será extraído a superficie y descargado directamente a camiones de volteo o a una tolva para su traspaleo posterior. El destino de dichos camiones serán los bancos de tiro o de almacenamiento establecidos y autorizados para el proyecto.
- d. El material excavado debe sustituirse en todo momento por lodo bentonítico. Se debe cuidar que los lodos mantengan siempre su nivel dentro de los brocales, cuidando que el nivel del lodo bentonítico nunca se encuentre a más de 0.5 m por debajo del nivel del brocal.
- e. Se deberá cuidar la verticalidad en la excavación del tablero, no rebasando una desviación máxima de 0.5% respecto a la vertical. Se deberá observar y corroborar una perpendicularidad entre el kelly o el cable de suspensión respecto a la horizontal dada por los brocales.
- f. Una vez finalizada la excavación de algún tablero, se colocarán las juntas metálicas (en este caso juntas de sección trapezoidal) que a su vez sirven de cimbra en los extremos de los tableros excavados. Las juntas metálicas no deben apoyarse en el fondo de la excavación, por lo cual será suspendida desde los brocales. La principal función de esta junta es fijar el límite del tablero y crear en el concreto a colocar una superficie de contacto adecuada para la correcta unión al concreto del siguiente tablero por excavar, recordando que la excavación de tableros se hace en forma alternada y que, para poder excavar el tablero contiguo deberán pasar, cuando menos, 3 días.

#### **D. Colocación de acero de refuerzo para muro Milán**

- a. Una vez terminada la excavación del tablero, se coloca el acero de refuerzo previamente habilitado en los diámetros y longitudes indicados en proyecto. Se pueden construir plantillas de concreto simple o camas de madera durante el proceso de armado para asegurar su uniformidad.
- b. El armado será contraventeado adecuadamente y suficientemente rigidizada a fin de evitar pandeos y dobleces que pudieran aparecer durante la manipulación de la parrilla de armado completa. Se deberá revisar la capacidad de las grúas que se utilizarán en el izaje, diseñar apropiadamente las vigas de reparto, utilizar preferentemente los dos cables de la grúa de servicio y, tener en cuenta que las parrillas de armado se irán introduciendo en longitudes de 12.0 m, por lo cual habrá que cuidar el espacio vertical para no interferir con ninguna línea de distribución de energía, por ejemplo.
- c. Casi al finalizar la introducción de la primera parrilla de acero dentro de la excavación del tablero, se colocarán las trampas en los brocales para estabilizar y mantener suspendida la parrilla; una vez hecho esto, se hacen los preparativos para el izaje de la segunda parrilla de armado de acero. Cuando la segunda parrilla haya sido izada, se suspenderá verticalmente sobre la primera parrilla (atrapada mediante trampas contra el brocal) para hacer el acople de los conectores mecánicos roscados al 50% de traslape o soldadura en su caso, con lo cual, mediante tramos de 12.0 m se alineará en cualquier longitud las parrillas de armado de los diferentes tableros. Una vez conectadas todas las varillas de la primer parrilla con la segunda, se libera la trampa y se continúa con la introducción de la parrilla de ahora, 24 m de longitud total. Y así sucesivamente hasta alcanzar la profundidad de proyecto con las parrillas de acero de refuerzo.
- d. Una vez que la parrilla esté lista en toda su longitud, se deberá suspender aproximadamente a 20 cm del fondo de la excavación por medio de las trampas colocadas en los brocales. La parrilla de armado deberá tener equipada los separadores necesarios para garantizar el recubrimiento de concreto en ambas caras. Tras la introducción del acero de refuerzo, se preparará el colado del concreto.

#### **E. Colado del muro Milán**

- a. Antes de cada colado, se controlarán visualmente las características del concreto, tomando las muestras para ensayo previstas. El colado deberá ser ininterrumpido. El concreto debe tener una resistencia a la compresión de  $f'c=350$  kg/cm<sup>2</sup> clase I y revenimiento de 18 cm  $\pm$  3 cm y ser autocompactable. En algunas

circunstancias específicas de obra pudiera ser necesario el empleo de aditivos retardantes de fraguado, no siendo esto un justificante para alterar la dosificación de planta.

- b. La herramienta para la introducción del concreto fresco en las zanjas estabilizadas con lodo bentonítico para el muro Milán es el tubo tremie, cuya correcta operación permite lograr muros de buena calidad exentos de contaminación. El método en palabras sencillas consiste en introducir la tubería y empezar el colado desde el fondo de la excavación y gradualmente levantarla manteniendo siempre la punta de descarga dentro de la masa ya colada, para evitar la contaminación y segregación del concreto. La aparente sencillez de la técnica fomenta el descuido en los detalles, resultando en muros defectuosos que hasta que se realiza la excavación del núcleo de la lumbrera se pueden comprobar visualmente. Para el colado de los tableros es necesario el uso de una tubería tremie con tolva (de 60 a 80°), cuidando que dicha tubería, antes de iniciar el colado, no llegue a menos de 20 cm del fondo, es decir, debe quedar suspendida. Se debe cuidar que los tramos de tubería sean de 1.0 a 3.0 m con la finalidad de un rápido desarme de la tubería conforme se avanza en el colado del concreto. Es importante señalar que la tubería debe ser pesada para resistir la fuerza de reacción durante el vaciado del concreto. Una vez que la tubería sea introducida en la zanja, aquella estará llena de lodo bentonítico. Se requiere entonces de un tapón deslizante de separación entre el concreto y el lodo de tal modo que vaya bajando hacia la salida de la tubería conforme se vacía el concreto. Este tapón usualmente en excavaciones no tan profundas consiste en una cámara de balón de fútbol o algún balón parecido, teniendo en cuenta que debe ajustar a la perfección en la pared interior del tubo; sin embargo, como esa cámara o pelota puede quedar atrapada en el acero, se ha dado por sustituirla por una bolsa de tela llena de concreto fresco. Si se cuelan muros muy profundos, se puede recurrir a un tapón de pie que se desprende con el peso del concreto. Dicho tapón de pie deberá tener, al igual que los segmentos de tubería, juntas herméticas.
- c. Una vez iniciado el colado debe cuidarse no levantar la tubería demasiado asegurando que quede introducida de 1.0 a 4.0 m dentro del concreto ya vertido para asegurar el correcto desplazamiento del lodo bentonítico. El objetivo principal es evitar la contaminación del concreto. Se recomienda contar con tubos de diferentes longitudes para combinar de acuerdo a la profundidad de la zanja, evitando secciones largas en la parte superior que dificulte la maniobra.
- d. El lodo bentonítico desplazado durante el colado del tablero es retirado mediante el empleo de bombas de lodos y, dependiendo su calidad, pudieran reutilizarse

previo tratamiento. En caso de no ser necesario el tratamiento, pudieran simplemente almacenarse en la planta o pudiera darse el caso también en que los lodos fueran dispuestos en el sitio de tiro oficial. En cualquiera de los casos el manejo de los lodos debe ser cuidadoso. Durante el progreso del colado se debe ir desmontando la tubería tremie pero controlando siempre la distancia mínima sumergida dentro del concreto ya vertido. Para identificar posibles fugas de concreto y/o lodo bentonítico, sobre-excavaciones o fisuras del terreno se debe llevar un control preciso de los niveles alcanzados al vaciar cada olla revolvedora, viendo que los volúmenes de lodos desplazado debe ser acorde a los volúmenes de concreto vertido.

- e. El colado se da por terminado cuando el concreto vertido alcanza una cota superior a la prevista en proyecto tomando en cuenta la longitud de descabece para saneo. La cota se controla en los extremos de los tableros y en la zona próxima a la tubería tremie. Cuando termina el colado se debe lavar cuidadosamente el tubo tremie y en caso necesario, cambiar los sellos de hule.
- f. La extracción de la junta metálica se puede hacer en cualquiera de los dos siguientes casos: a) en las horas siguientes a la terminación del colado, de manera gradual dejando transcurrir el tiempo necesario para que el concreto fragüe y quede en él la huella, b) cuando se haya finalizado (con la mayor celeridad posible) la perforación del módulo adyacente y se haya realizado su limpieza, con el fin de conservar el contacto con el concreto del tablero adyacente.
- g. Dentro del muro Milán se dejarán reservaciones para instalar 4 inclinómetros hasta 51.0 m de profundidad. Los inclinómetros son instrumentos que nos permiten conocer la distribución con respecto a la profundidad de los desplazamientos horizontales que se presentan en la masa de suelo cercana a la excavación. Adicionalmente, se deberán dejar tubos de reservación para la realización de pruebas de integridad tipo sónico con un total de 6 tubos en 3 tableros diferentes. Las pruebas de integridad se basan en la transmisión de ondas sísmicas producidas a lo largo del elemento y su posterior recepción por medio de geófonos mediante 2 tubos paralelos para que, simulando un efecto de cross hole, se pueda determinar la integridad del elemento colado desde superficie. Estas pruebas son muy útiles y comunes en pilas, pilotes y muros Milán.
- h. Cabe destacar que el curado de los muros Milán suele ser perfecto y estar exento de contracción por secado por el ambiente húmedo en que se encuentra. Diferentes pruebas han demostrado una adherencia excelente con el suelo, acero, roca y concreto.

- i. El revestimiento definitivo de la lumbrera será el muro Milán en etapa de obra, el proyecto no contempla muros de acompañamiento. Una vez colado el tablero, se comienza la excavación del tablero siguiente indicado en la secuencia en proyecto.

#### **F. Sistemas de bombeo profundo y de achique**

- a. Los objetivos primordiales del bombeo son: a) generar una aureola de material endurecido por secado –en toda la periferia de la excavación- y, b) reducir el flujo de agua hacia el interior de la lumbrera favoreciendo la seguridad y los rendimientos en la excavación.
- b. El sistema de bombeo profundo en el exterior de la Lumbrera se basa en 6 pozos profundos llevados hasta 73.0 m de profundidad. Tratando de reducir la afectación al manto freático, los pozos estarán sellados desde nivel de superficie y hasta 53.0 m de profundidad por medio de un relleno fluido con f'c entre 10 y 20 kg/cm<sup>2</sup>. El material de filtro (tubo metálico ranurado, rodeado por grava) se colocará de 53.0 hasta 73.0 m de profundidad.
- c. El bombeo profundo iniciará después de concluido el muro Milán y antes de iniciar la excavación del núcleo y se deberá complementar con un bombeo de achique al interior de la excavación para evitar la inundación del área de trabajo.
- d. Las perforaciones para los pozos servirán también para muestrear bloques de material cortado por la perforadora los cuales serán inspeccionados en campo por el equipo de proyecto y la supervisión técnica. Esta nueva información complementará los trabajos de exploración y laboratorio para definir si a partir de 51.0 m de profundidad es necesario hacer algún mejoramiento del suelo.
- e. Con la finalidad de dar seguimiento al abatimiento del nivel de aguas freáticas (NAF) en la periferia de la Lumbrera, se propone la perforación y equipamiento de un pozo de observación. El agua obtenida del bombeo se dispondrá donde el cliente lo defina.
- f. El sistema de bombeo podrá construirse de forma simultánea a la construcción del muro Milán y será constante durante el proceso de excavación del núcleo de la Lumbrera.

#### **G. Trabe de coronamiento**

- a. La construcción de la trabe de coronamiento comenzará una vez que se hayan concluido la totalidad de los muros Milán.
- b. Se inicia con el retiro del brocal interior que previamente sirviera como guía para la excavación de tableros. Posteriormente habrá que excavar una zanja hasta

nivel de desplante de la trabe y comenzar el descabece de los muros Milán para llevar a cabo la unión estructural del acero de refuerzo del muro con el de la trabe de coronamiento.

- c. Se habilitará el acero de refuerzo y se suministrará, habilitará y colocará la cimbra para posteriormente hacer el colado de la trabe con concreto de resistencia  $f'c=250 \text{ kg/cm}^2$  y revenimiento de  $14 \pm 2 \text{ cm}$ .

#### **H. Excavación del núcleo**

- a. Se le llama núcleo de la lumbrera al suelo que se encuentra al interior del perímetro formado por los muros Milán. La excavación de dicho núcleo es un procedimiento a cielo abierto que únicamente podrá iniciarse una vez que se haya terminado la construcción de la trabe de coronamiento.
- b. Se debe preparar la instrumentación necesaria (como el caso de los inclinómetros) para la medición de movimientos tanto horizontales como verticales y tomar la lectura cero de los instrumentos antes de iniciar la excavación. También debe verificarse que se cuente en obra con todos los planos necesarios para ejecutar los trabajos conforme a proyecto así como coordinar con la superintendencia de maquinaria para ajustar un programa de trabajo que garantice la continuidad de los trabajos.
- c. La excavación del núcleo se llevará a cabo con retroexcavadora. Durante el proceso de excavación se deberá contar con los camiones suficientes para realizar el retiro del material producto de la excavación al tiro asignado.
- d. La rezaga en ese caso se extraerá mediante botes de 7 a  $14 \text{ m}^3$  de capacidad y grúa.
- e. En las zonas donde se presenten filtraciones a través de las juntas del muro Milán o bien en zonas donde el concreto presente segregaciones, se deberán realizar inyecciones de lechada agua-cemento y aditivo o bien, agua-cemento-arena y aditivo. Las filtraciones que se susciten al interior de la Lumbrera se remediarán mediante bombeo de achique para recolección de agua a un cárcamo de bombeo en donde se contará con una bomba sumergible para llevar el agua a la superficie.
- f. Los últimos metros de excavación se deben realizar con cuidado dejando las últimas decenas de centímetros de excavación por medios manuales para afinar la superficie donde se construirá la losa de fondo.

#### **I. Construcción del anillo de rigidez**

- a. Conforme avance la excavación del núcleo de la lumbrera, cuando se llegue a una profundidad de 37 m deberá construirse un anillo de rigidez. Cuando la máquina

tuneladora se aproxima a la lumbrera, se deben hacer preparativos para su paso: se deberá demoler el concreto de los muros en el diámetro de la tuneladora así como cortar todo el acero de refuerzo. Existen configuraciones de máquinas tuneladoras capaces de cortar concreto reforzado, sin embargo, para las condiciones blandas de los suelos que excava, sería innecesario configurar la tuneladora de manera sobrada con las herramientas para demoler concreto, con el costo que esto pudiera generar. Es por esta apertura de los muros Milán que se construye el anillo de rigidez, que con 2.0 m de peralte y 0.75 m de espesor, evita deformaciones excesivas y ayuda a rigidizar la zona baja de la lumbrera.

#### **J. Construcción de la losa de fondo**

- a. Llegando al nivel máximo de excavación se colocará un firme de concreto pobre de aproximadamente 5 cm de espesor, previo al colado de la losa. El peralte de la losa será de 2.0 m.
- b. Se procede entonces a la colocación del acero de refuerzo previamente habilitado en sus diámetros y longitudes correspondientes a proyecto, cuidando de colocar los separadores para garantizar los recubrimientos especificados.
- c. Se realiza el colado con concreto hidráulico con resistencia  $f'c=350 \text{ kg/cm}^2$  y revenimiento de  $18 \pm 2 \text{ cm}$ , verificando el correcto acomodo del concreto mediante un vibrado competente.
- d. Es importante que el colado se realice mediante una línea de tubería de colado con un dispositivo que evite la segregación del concreto durante la colocación a más de 50.0 m de profundidad.

#### **K. Seguridad e higiene**

- a. En obra debe definirse a un responsable de Seguridad e Higiene cuyo objetivo principal será el evitar accidentes tomando acciones preventivas, haciendo que el lugar de trabajo sea un lugar seguro. Algunas de las funciones más importantes del responsable son:
  - Realizar recorridos constantes a diferentes frentes de la obra para detectar oportunamente situaciones de riesgo.
  - Validar las canastillas de personal, elementos de izaje, suspensión de armados de muro Milán, revisión de plataformas de trabajo, etc.
  - Es el responsable directo del cumplimiento de las normas de seguridad por parte del personal, tarea que pudiera no ser tan fácil dada la cierta resistencia de los obreros a acatar medidas de seguridad.

- Pedir los manuales de mantenimiento de la maquinaria y supervisar que se realicen las operaciones de mantenimiento según lo especifica el proveedor.
- Revisión de amarres de cables, cadenas, mordazas, mástil, etc. al menos una vez por semana.
- Facilitar un alumbrado correcto para los trabajos nocturnos realizados.
- En caso de incumplimiento reiterado por parte de algún trabajador de las normas dadas será motivo suficiente para expulsar al operario de la obra.

Para el caso de algunas lumbreras en donde los desplazamientos al abrirlas para el paso de la tuneladora pudieran ser excesivos –con la probabilidad de inestabilidad que ello conlleva- se consideró necesario realizar un mejoramiento del suelo a la entrada y salida de la tuneladora por medio de jet grouting. Esta técnica (traducida como “chorro de cemento”) se define como un método que propone mezclar y cortar el suelo in situ, a través de energía hidráulica a alta velocidad y mezclarlo con una lechada dando como resultado una mezcla de suelo-cemento llamada en ocasiones “suelocreto”. Bajo este concepto se mejoran las propiedades físicas de la formación y actúa como método de estabilización, con lo que se pretende modificar e incrementar las características mecánicas del suelo tratado, compresión y módulo de elasticidad mientras, simultáneamente, se disminuye la permeabilidad.

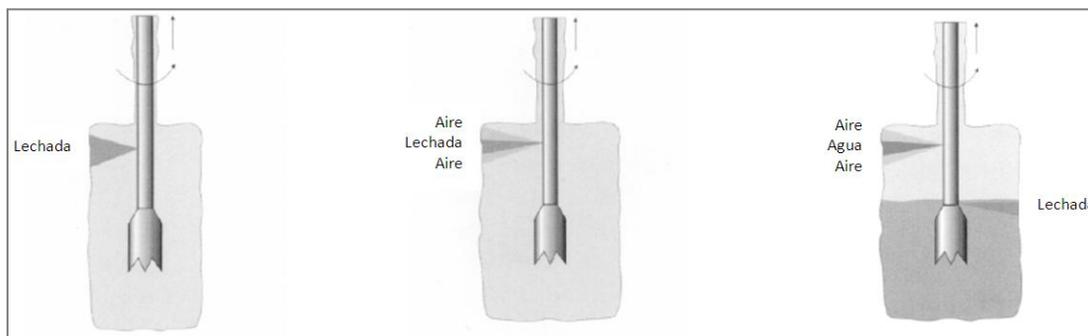
Es una técnica muy versátil ya que permite la estabilización de una variada gama de suelos desde gravas hasta arcillas, y con una ventaja significativa respecto a las inyecciones convencionales. En éstas, la cuantificación y por tanto la estimación de los volúmenes de material a inyectar y los plazos de ejecución poseen cierta incertidumbre. En cambio, el jet grouting permite cuantificar y valorar a priori, de forma teórica y por ensayos previos in situ, los cálculos realizados y así optimizar el tratamiento.

Este sistema posee ciertas variantes en función del mejoramiento que se quiera lograr:

- Sistema de barra simple tipo 1.- en este sistema la lechada es inyectada por una o varias boquillas con presiones de alrededor de  $400 \text{ kg/cm}^2$  (cerca de 40 MPa) que simultáneamente corta el suelo y lo mezcla con lechada. El proceso continúa con la extracción y rotación de la barra de inyección a una relación constante en cualquier estrato para crear la columna de suelo-cemento. Este sistema es el considerado en este mejoramiento.
- Sistema de barra doble tipo 2.- Es una forma más avanzada en la cual los efectos erosivos son considerablemente mayores por la adición de un chorro de aire comprimido con presiones que varían de  $2.0$  a  $15 \text{ kg/cm}^2$  (aproximadamente de 0.2 a 1.5 MPa). En este

caso se tienen dos sistemas alternos de barras para separar el suministro de lechada y aire, donde la función de la lechada es erosionar y mezclar el suelo y la del aire es incrementar el efecto erosivo.

- Sistema de barra triple tipo 3.- Este sistema usa un chorro de aire y agua para el corte del suelo que está separado de la boquilla de inyección de la lechada. Este arreglo necesita de tres tubos concéntricos para separar las diferentes fases: aire, agua y lechada. La presión y la relación de flujo de lechada, agua y aire podrían todas varias independientemente para dar la geometría deseada y la mezcla de suelo cemento requerido. La presión de agua está alrededor de los 500 kg/cm<sup>2</sup> (cerca de 50 MPa) y la presión de aire varía entre 2.0 y 15 kg/cm<sup>2</sup> (entre 0.2 y 1.5 MPa). No se hace necesario que la lechada sea alta, generalmente se encuentra entre 5.0 y 30 kg/cm<sup>2</sup> (de 0.5 a 3.0 MPa aproximadamente). Dependiendo de la velocidad de extracción y los parámetros de inyección seleccionados, el sistema puede ser diseñado para mezclar el suelo con la lechada o para remover el suelo y reemplazarlo con lechada.



**Figura 20.- Esquematación de los tres diferentes tipos de inyección de jet grouting: sistema de barra simple tipo 1, de barra doble tipo 2 y de barra triple tipo 3. Para el mejoramiento en la L04 se utilizó el tipo 1.**

| Método                  | Sistema tipo 1                            | Sistema tipo 2                  | Sistema tipo 3                     |                                       |
|-------------------------|---|---------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|
| Sistema                 | Inyección de lechada                      | Inyección aire-lechada          | Inyección agua/aire                | Inyección de lechada                  |
| Presión                 | 200-400 kg/cm <sup>2</sup><br>(20-40 MPa) | 200 kg/cm <sup>2</sup> (20 MPa) | 400 kg/cm <sup>2</sup><br>(40 MPa) | 20-30 kg/cm <sup>2</sup><br>(2-3 MPa) |
| Descarga                | 60 l/min                                  | 60 l/min                        | 70 l/min                           | 180-200 l/min                         |
| Diámetro de la boquilla | 2-3 mm                                    | 2-3 mm                          | 2-3.5 mm                           |                                       |
| Aire                    | No aplica                                 | 1-2 m <sup>3</sup> /min         | 1-3 m <sup>3</sup> /min            |                                       |
| Rotación de la barra    | 10-20 rpm                                 | 5-10 rpm                        | 5 rpm                              |                                       |

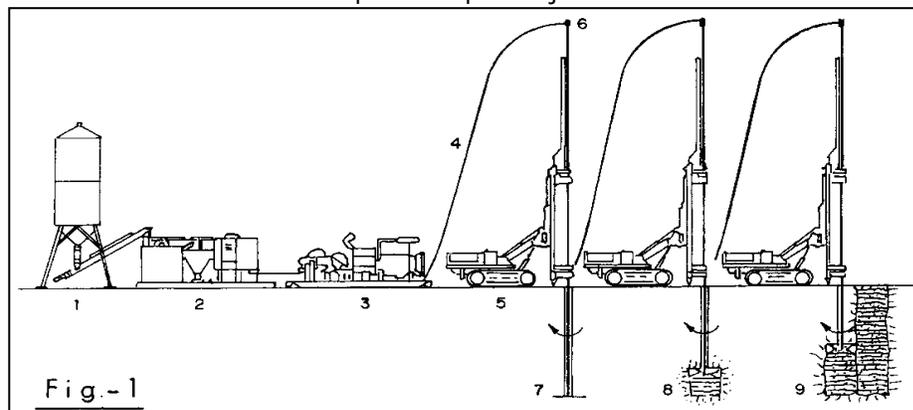
|                         |           |            |            |
|-------------------------|-----------|------------|------------|
| Diámetro de la columna  | 50-100 cm | 80-150 cm  | 150-300 cm |
| Velocidad de extracción | 3-5 min/m | 6-20 min/m | 20 min/m   |

**Tabla 8.- Tabla resumen donde se concentran las principales características de los tres sistemas de inyección jet grouting.**

Sabiendo lo anterior, se puede proponer el procedimiento constructivo para las 479 columnas de suelo cemento (177 a la entrada y 302 a la salida) por medio de jet grouting con 0.80 m de diámetro:

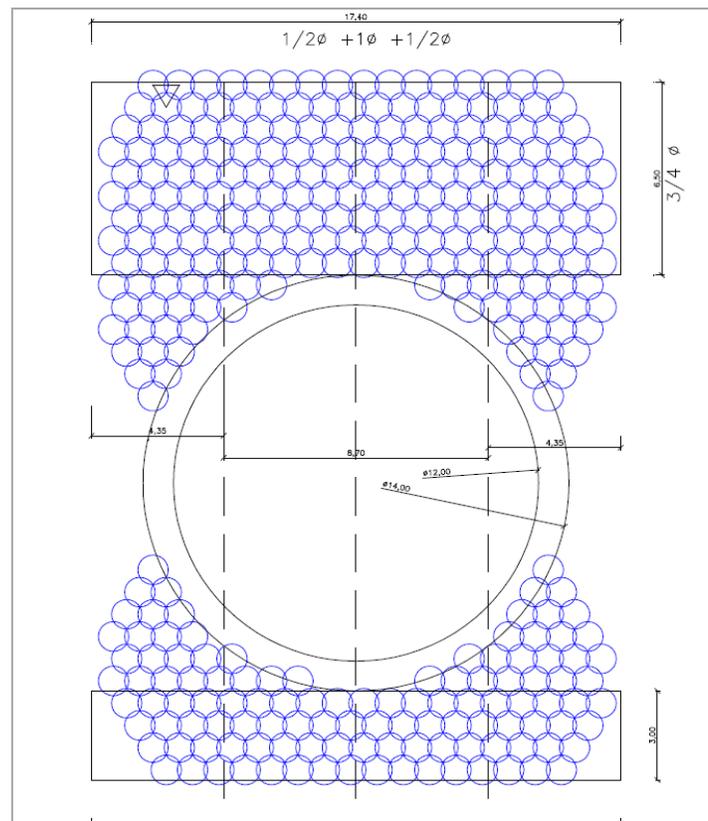
#### L. Mejoramiento del suelo por medio de Jet Grouting

- a. Se deberán posicionar e instalar todos los equipos fijos necesarios para la ejecución del mejoramiento:
  - Bomba de inyección a alta presión
  - Planta de elaboración de lechadas
  - Silo de cemento para la alimentación de la planta
  - Suficientes depósitos de agua
  - Mangueras de comunicación entre los diferentes equipos
  - Equipos auxiliares como taller, grupos de energía, bombas de limpieza etc.
- b. Se deberán hacer los preparativos necesarios para un carro perforador que tenga el equipo necesario para la doble misión tanto de hacer la perforación como de realizar la columna de suelo cemento. Es necesario que esté equipado con una cabeza de rotación de corte apropiada para el terreno a tratar. La cabeza de rotación se desplazará sobre un mástil con longitud suficiente para ejecutar columnas de hasta 18 m de longitud en una sola etapa. De esta manera se dará celeridad a los trabajos y mejorará la calidad de la ejecución de la columna.
- c. Una vez establecidos los parámetros de ejecución de las columnas, se programan en un controlador en tiempo real para ejecutar de manera automática la



**Figura 21.- El esquema muestra el proceso de la ejecución de las columnas de jet-grouting: desde la planta dosificadora de lechada hasta la ejecución una columna secante a otra.**

excavación, controlando la velocidad de extracción y giro automáticamente por medio de un dispositivo electrónico instalado en el carro perforador. Los parámetros de caudal de lechada y presiones utilizadas se pueden controlar en tiempo real para variar el procedimiento (situación que no debería ser común debido a las pruebas realizadas con anterioridad) si se requiriera. La inyección comenzará una vez que se alcance la cota máxima de perforación y es recomendable, como ya se ha mencionado, que no se detenga hasta que finalice la ejecución de la columna.



**Figura 22.- 479 columnas de suelo-cemento hechas por jet-grouting como mejoramiento del suelo a la salida y a la entrada de la lumbrera: 177 a la entrada y 302 a la salida.**

- d. Al finalizar cualquier columna, se deberá rellenar por gravedad (con la misma lechada utilizada) el resto de la perforación estéril.
- e. El tiempo de curado mínimo es de 24 h, lo cual limita la ejecución de columnas adyacentes haciendo necesaria una correcta planeación en la ejecución de las columnas. Dicha planeación incluye, por ejemplo, una ejecución en tresbolillo, que la ejecución se haga de manera homogénea a ambos lados de la lumbrera y también, evitar dejar zonas de tratamiento entre los muros Milán y otras columnas ya ejecutadas con el fin de evitar sobrepresiones en el trasdós. En

general, la ejecución va de las zonas próximas a las zonas más alejadas de la lumbrera.

- f. En planta, el mejoramiento recomendado para la L-04 consiste en, simplificándolo, dos rectángulos: a la entrada uno de 17 x 3.0 m y a la salida otro de 17 x 7 m. En elevación, la longitud de las columnas por ejecutar será de 2.5 veces el diámetro, distribuido de la siguiente manera: 1.0 diámetro por encima de la clave, 1.0 diámetro que es precisamente el diámetro del túnel y 0.5 veces el diámetro por debajo de la rasante hidráulica.



**Figura 23.- En la fotografía de la izquierda se muestra un túnel al cual, para su avance, se recurrió al mejoramiento del suelo por medio de jet grouting. En la foto de la derecha, se muestra precisamente una vista mostrando la clave donde se aprecian los arcos metálicos y por encima de ellos, se alcanzan a ver las columnas cortadas, tangentes en este caso, del mejoramiento por jet grouting. Ambas fotografías corresponden al túnel de interconexión de los Cárcamos 1 y 2 con la Lumbrera 04 del Túnel Río de la Compañía.**

### **3.8. Alcances del diseño geotécnico**

El diseño geotécnico es apenas un eslabón de un proceso de diseño que tiene su culminación con la construcción de la lumbrera aunque, en ocasiones, el diseño mismo debe ajustarse conforme se descubren las condiciones reales del sitio.

Es de primera importancia proporcionar al ingeniero estructurista los elementos básicos con los que se pueda hacer un predimensionamiento de los elementos estructurales: cálculo de empujes laterales sobre muro, cálculo de subpresiones sobre losa de fondo así como módulos de reacción horizontales y verticales. Con estos datos se proponen dimensiones tentativas de muro Milán y

losa de fondo, con las cuales es posible definir propiedades de placas para el modelo en Plaxis y llevar a cabo un primer análisis.

Un posible resultado de dicho análisis es que el suelo sea llevado a la falla por medio de un procedimiento de excavación inadecuado o por etapas constructivas con avances de excavación muy grandes. Sin embargo, si el diseño de la excavación es adecuado, se puede presentar también que los desplazamientos en elementos estructurales pudieran ser mayores a los permisibles, para lo cual se debe hacer una revisión del dimensionamiento inicial y un segundo predimensionamiento, siendo este un proceso iterativo, que generalmente no se prolonga demasiado.

Una vez que el diseño estructural está avalado, se comprueba nuevamente que los desplazamientos cumplan con la normatividad y se retroalimenta al estructurista con los elementos mecánicos sobre los elementos placa proporcionados por el modelo en Plaxis para verificar que efectivamente la variación de dichos datos no afecte el dimensionamiento que en su momento obtuvo el estructurista con elementos mecánicos propios.

### **3.8.1. Parámetros geotécnicos**

Los parámetros geotécnicos de análisis corresponderán a los indicados en la Tabla 7 del Modelo Geotécnico. En los métodos analíticos, la consideración de la piezometría del sitio se hace tal cual se reporta para evidenciar los posibles problemas por la presión de agua alrededor de los 25.0 m de profundidad; sin embargo para el modelado numérico se considera rigurosamente el procedimiento constructivo con la ejecución del bombeo profundo antes del comienzo de la excavación.

### **3.8.2. Métodos analíticos**

Se realizaron análisis de estabilidad para cada una de las lumbreras usando modelos de equilibrio límite (MEL); en cada caso la expresión usada atendió al mecanismo de falla considerado:

- Empujes horizontales
- Estabilidad de zanja para muro Milán
- Falla de fondo
- Falla por subpresión
- Falla por flotación

Los pasos a seguir fueron:

- a) Definir la profundidad de los muros buscando empotrarlos en estratos suficientemente resistentes y poco deformables.
- b) Calcular el espesor de los muros tomando en cuenta que éstos, al construirse por paneles independientes, tiene tolerancias de verticalidad y si un panel se desvía de otro, el espesor de contacto entre ellos debe ser tal que soporte los esfuerzos horizontales totales al nivel máximo de excavación, sin rebasar el esfuerzo en compresión del concreto.
- c) Evaluar los factores de seguridad para cada uno de los mecanismos de falla posible aceptando como permisibles los FS mínimos reportados en la bibliografía.
- d) Estimar los desplazamientos en el terreno producto de la construcción de la lumbrera, a través de modelos de elementos finitos que tomaran en cuenta el procedimiento constructivo.

A continuación se presentan los modelos de equilibrio límite usados en la determinación de los factores de seguridad para la Lumbrera 04:

- *Cálculo de las presiones laterales sobre muro*

La determinación de las presiones laterales a las cuales estará sometido el muro Milán forman parte de los alcances del análisis geotécnico. Para su cálculo, se utilizaron los criterios de Rankine de presiones a corto plazo (condición activa) y largo plazo (condición en reposo). Las primeras columnas muestran los parámetros mecánicos de peso volumétrico, cohesión y ángulo de fricción interna por estrato.

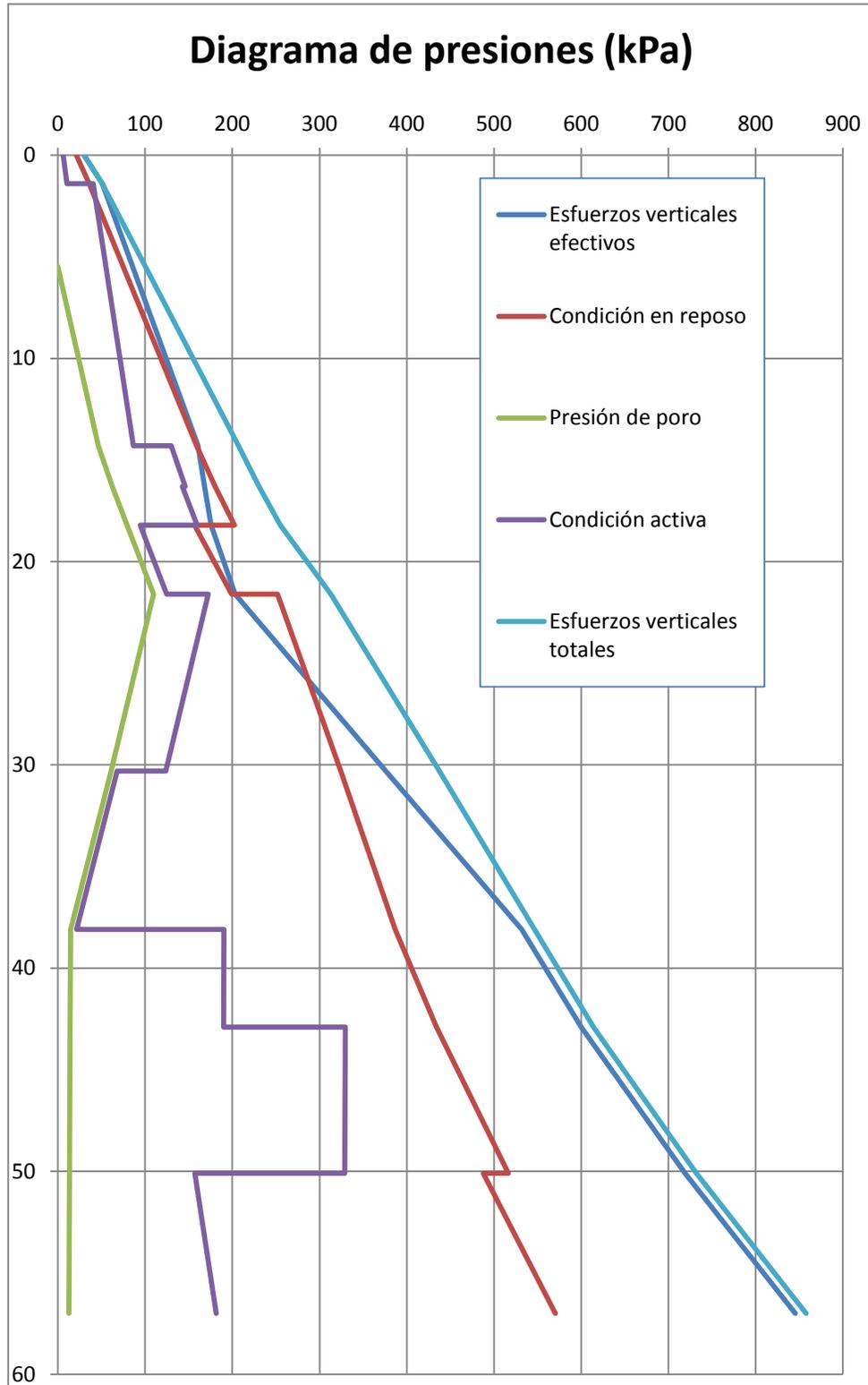
El cálculo del coeficiente de empuje activo  $K_a$  se realiza empleando la ecuación  $K_a = \tan^2(45 - \frac{\varphi}{2})$ , mientras que el cálculo del coeficiente de empuje en la condición de reposo se calcula como  $K_o = 1 - \text{sen}\varphi$  para suelos donde su ángulo de fricción interna sea sensiblemente mayor en aportación a la resistencia respecto a su cohesión y  $K_o = \frac{\nu}{1-\nu}$  para suelos predominantemente cohesivos.

La piezometría utilizada corresponde a la que CFE reportó en su campaña de exploración, es decir, no se consideran, conservadoramente, los efectos del bombeo profundo.

Los resultados se muestran en la Tabla 9.

| Unidad | $\gamma$<br>(kN/m <sup>3</sup> ) | c<br>(kPa) | $\phi$ (°) | K <sub>a</sub> | K <sub>0</sub> | H (m) | Peso del estrato<br>(kN) | Prof.<br>(m) | Presiones                        |                          |   |                |                     |                                    | Corto Plazo                      | Largo Plazo                      |
|--------|----------------------------------|------------|------------|----------------|----------------|-------|--------------------------|--------------|----------------------------------|--------------------------|---|----------------|---------------------|------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
|        |                                  |            |            |                |                |       |                          |              | Vertical total, $\sigma_v$ (kPa) | Presión de poro, u (kPa) | Verticales efectivos, $\sigma'_v$ (kPa) | Presión activa | Condición en reposo | Presión activa redistribuida (kPa) | Activa mas presion de poro (kPa) | Reposo mas presion de poro (kPa) |
| A      | 15.0                             | 80.0       | 10         | 0.70           | 0.70           | 1.40  | 21.00                    | 0            | 30                               | 0                        | 30                                      | -113           | 21                  | -106                               | 6                                | 21                               |
|        |                                  |            |            |                |                |       |                          | 1.4          | 51.00                            | 0                        | 51                                      | -98            | 36                  | -106                               | 10                               | 36                               |
| B      | 12.1                             | 32.8       | 0          | 1.00           | 0.70           | 12.90 | 156.09                   | 1.4          | 51.00                            | 0                        | 51                                      | -15            | 36                  | 40                                 | 40                               | 36                               |
|        |                                  |            |            |                |                |       |                          | 14.3         | 207.09                           | 46.37                    | 161                                     | 95             | 113                 | 40                                 | 87                               | 159                              |
| C1     | 11.8                             | 40.5       | 0          | 1.00           | 0.70           | 2.00  | 23.60                    | 14.3         | 207.09                           | 46.37                    | 161                                     | 80             | 113                 | 84                                 | 130                              | 159                              |
|        |                                  |            |            |                |                |       |                          | 16.3         | 230.69                           | 62.38                    | 168                                     | 87             | 118                 | 84                                 | 146                              | 180                              |
| C2     | 12.8                             | 45.8       | 0          | 1.00           | 0.70           | 1.90  | 24.32                    | 16.3         | 230.69                           | 62.38                    | 168                                     | 77             | 118                 | 80                                 | 143                              | 180                              |
|        |                                  |            |            |                |                |       |                          | 18.2         | 255.01                           | 79.33                    | 176                                     | 84             | 123                 | 80                                 | 160                              | 202                              |
| C3     | 17.0                             | 36.2       | 34         | 0.28           | 0.44           | 3.40  | 57.80                    | 18.2         | 255.01                           | 79.33                    | 176                                     | 11             | 77                  | 15                                 | 94                               | 157                              |
|        |                                  |            |            |                |                |       |                          | 21.6         | 312.81                           | 109.67                   | 203                                     | 19             | 89                  | 15                                 | 125                              | 199                              |
| D      | 14.3                             | 113.5      | 0          | 1.00           | 0.70           | 8.70  | 124.41                   | 21.6         | 312.81                           | 109.67                   | 203                                     | -24            | 142                 | 63                                 | 172                              | 252                              |
|        |                                  |            |            |                |                |       |                          | 30.3         | 437.22                           | 61.13                    | 376                                     | 149            | 263                 | 63                                 | 124                              | 324                              |
| F1     | 14.0                             | 200.6      | 6          | 0.81           | 0.70           | 7.80  | 109.20                   | 30.3         | 437.22                           | 61.13                    | 376                                     | -56            | 263                 | 7                                  | 68                               | 324                              |
|        |                                  |            |            |                |                |       |                          | 38.1         | 546.42                           | 14.51                    | 532                                     | 70             | 372                 | 7                                  | 21                               | 387                              |
| F2     | 14.1                             | 138.7      | 9          | 0.73           | 0.70           | 4.80  | 67.68                    | 38.1         | 546.42                           | 14.51                    | 532                                     | 151            | 372                 | 176                                | 190                              | 387                              |
|        |                                  |            |            |                |                |       |                          | 42.9         | 614.10                           | 14                       | 600                                     | 201            | 420                 | 176                                | 190                              | 434                              |
| G1     | 16.4                             | 172.0      | 0          | 1.00           | 0.70           | 7.20  | 118.08                   | 42.9         | 614.10                           | 14                       | 600                                     | 256            | 420                 | 316                                | 330                              | 434                              |
|        |                                  |            |            |                |                |       |                          | 50.1         | 732.18                           | 13.24                    | 719                                     | 375            | 503                 | 316                                | 329                              | 516                              |
| G2     | 18.2                             | 355.5      | 20         | 0.49           | 0.66           | 6.90  | 125.58                   | 50.1         | 732.18                           | 13.24                    | 719                                     | -145           | 475                 | -114                               | 157                              | 488                              |
|        |                                  |            |            |                |                |       |                          | 57           | 857.76                           | 12.52                    | 845                                     | -83            | 558                 | -114                               | 182                              | 570                              |

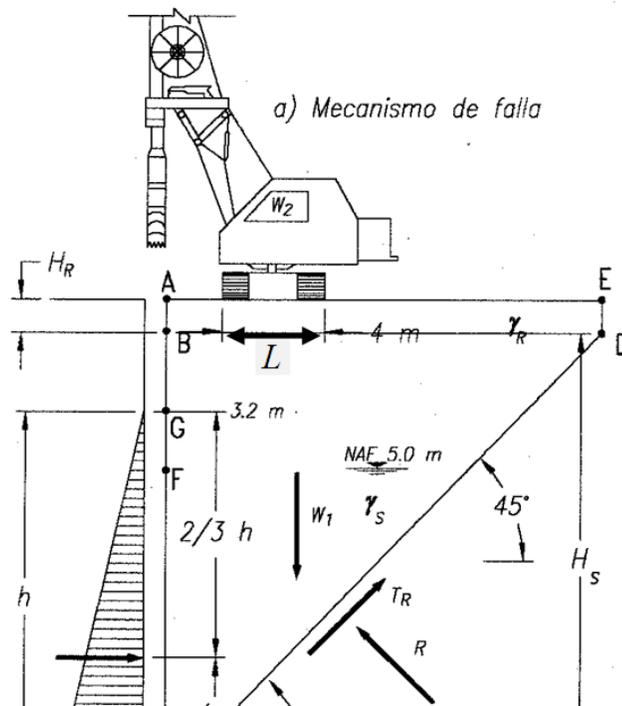
**Tabla 9.- Resultados en forma tabular de las presiones generadas sobre muro Milán, a corto y a largo plazo con el criterio de Rankine.**



**Figura 24.- Presiones laterales actuantes sobre muro Milán para condición activa y en reposo de acuerdo a Rankine. También se muestran los esfuerzos verticales así como la piezometría.**

- *Revisión de la estabilidad de zanja para muro Milán*

Durante la excavación de los tableros para muro Milán es posible inducir la inestabilidad de la zanja como un prisma de suelo que desliza desde la superficie hasta la profundidad excavada con la almeja. El lodo bentonítico que se introduce al interior genera una presión hidrostática que se opone a la generación de una eventual superficie de falla que corresponde a la condición activa de empuje del suelo. Así, es necesario determinar mediante un factor de seguridad de qué manera el trabajo de la almeja (y la grúa sobre la que va montada) así como la profundización de la excavación afectan la estabilidad de la citada masa de suelo.



**Figura 25.- Mecanismo de falla que muestra las fuerzas que intervienen en una eventual inestabilidad de la zanja para muro Milán.**

El factor de seguridad  $C$  puede evaluarse mediante la siguiente comparación para suelos predominantemente cohesivos:

$$FS = \frac{2c * H_s}{(W_r + W_s + W_2) - P_a}$$

$$W_r = H_r * H_s * \gamma_r$$

$$W_s = 0.5 * \gamma_s * H_s^2$$

$$W_2 = 30 \text{ kPa}$$

$$Pa = 0.5 * \gamma_f * h^2$$

Donde:

$W_r$  Peso del relleno

$W_s$  Peso de la cuña del suelo

$Pa$  Presión del fluido

$\gamma_f$  Peso volumétrico promedio del fluido  $\approx 10.5$  kPa

$h$  Profundidad del fluido sobre la cual ejerce el empuje  $\approx 49.6$  m

$\gamma_s$  Peso volumétrico promedio del suelo a la profundidad analizada  $\approx 14.5$  kPa

$\gamma_r$  Peso volumétrico promedio del relleno  $\approx 15.0$  kPa

$H_s$  Espesor de suelo  $\approx 49.6$  m

$H_r$  Espesor de relleno  $\approx 1.4$  m

$c$  Resistencia promedio a la profundidad de excavación  $\approx 135.7$  kPa

Sustituyendo:

$$FS = 2.2$$

$$2.2 > 1.5 \therefore \text{cumple.}$$

- *Revisión por falla de fondo*

Propuesto por Terzaghi y Prandtl, este mecanismo representa excavaciones profundas además donde es posible que se manifieste un repentino levantamiento del fondo de la excavación aunado a un asentamiento considerable en superficie con el consecuente colapso de la estructura de retención. Debido a la propia naturaleza del muro Milán y su arreglo anular, el mecanismo de falla de fondo sólo puede reproducirse en las últimas etapas de excavación, donde los espesores del suelo al interior del núcleo pudieran no desarrollar la adherencia necesaria para contener las considerables fuerzas descendentes del hipotético prisma rectangular en el exterior del núcleo.

Así, la falla de fondo se analiza para la última etapa de excavación, a 49.0 m, por considerarse la etapa más desfavorable:

$$FS = \frac{5.14 \left(1 + 0.2 \frac{H}{B}\right) \left(1 + 0.2 \frac{B}{L}\right) \bar{s}}{\bar{\gamma}H + ps}$$

Donde:

$\bar{s}$  Resistencia no drenada media a lo largo de la superficie de falla (se considera un comportamiento del suelo cohesivo-friccionante)  $\approx 165.7$  kPa

$\bar{\gamma}$  Peso volumétrico medio del suelo hasta la profundidad de excavación  $\approx 14.5$  kN/m<sup>3</sup>

$H$  Profundidad de excavación = 49 m

$B$  Ancho de la excavación = 13.5 m

$L$  Largo de excavación = 13.5 m

$ps$  Sobrecarga actuante en superficie = 30 kPa

$$\frac{H}{B} \leq 2.5$$

$$\frac{B}{L} \leq 1.0$$

Sustituyendo:

$$FS = 2.1 > 1.7 \therefore \text{cumple}$$

- *Revisión de falla por subpresión*

Para un nivel freático y una estratigrafía determinados, se pueden presentar ciertos estratos que por su composición granular tienen una baja permeabilidad y permiten el flujo de agua con relativa facilidad. Así, conforme se va avanzando en la excavación del núcleo de la lumbrera, el material que queda contenido por debajo del nivel máximo de excavación y por encima del estrato drenante induce un cierto esfuerzo a la profundidad del estrato drenante tal que debe ser mayor, en todo momento, a la presión piezométrica a dicha profundidad. Así, la representación de este modelo de falla intenta contrastar mediante un factor de seguridad, para una profundidad dada, cómo varía el esfuerzo vertical respecto a la presión piezométrica. Para el caso de la Lumbrera 04, se identificaron 3 unidades estratigráficas que por su naturaleza pudieran ser poco

permeables y también, a modo de ejercicio, se plantea el escenario de construcción sin el abatimiento del NAF para corroborar si el planteamiento del bombeo profundo antes de ejecutar la excavación tiene fundamento o bien, pudiera resultar innecesario.

$$FS = \frac{(H - Df) \bar{\gamma}_m}{u}$$

Donde:

$H$  Profundidad a la que inicia el estrato drenante

$Df$  Nivel máximo de excavación

$\bar{\gamma}_m$  Peso volumétrico medio del suelo comprendido entre  $Df$  y  $H$

$u$  Presión del agua a la profundidad  $H$

La siguiente tabla muestra el desarrollo del FS conforme se avanza en las diferentes etapas de excavación. Al haber 3 estratos drenantes, se deben hacer los cálculos con base en la profundidad a la que se encuentra cada uno de ellos y también conforme se avanza en la excavación del núcleo. Se puede prever que los menores factores de seguridad sucederán cuando se tenga un espesor de suelo reducido entre el nivel máximo de excavación y el estrato drenante. La gráfica posterior muestra cómo varía el FS con la profundidad.

| Primer estrato drenante  |       |     |   |                                  |
|--------------------------|-------|-----|---|----------------------------------|
| $H=$                     | 18.20 | m   | Condición                               |                                  |
| $u_{18.2}=$              | 79.10 | kPa |   |                                  |
| $Df_5=$                  | 5     | m   | $\gamma_{m5}=$ 12.40 kN/m <sup>3</sup>  | $FS_5=$ 2.1 > 1.3 ∴ cumple       |
| $Df_{10}=$               | 10    | m   | $\gamma_{m10}=$ 12.40 kN/m <sup>3</sup> | $FS_{10}=$ 1.3 = 1.3 ∴ no cumple |
| $Df_{15}=$               | 15    | m   | $\gamma_{m15}=$ 12.30 kN/m <sup>3</sup> | $FS_{15}=$ 0.5 < 1.3 ∴ no cumple |
| Segundo estrato drenante |       |     |   |                                  |
| $H=$                     | 30.30 | m   | Condición                               |                                  |
| $u_{30.3}=$              | 61.22 | kPa |   |                                  |
| $Df_{20}=$               | 20    | m   | $\gamma_{m20}=$ 13.10 kN/m <sup>3</sup> | $FS_{20}=$ 2.2 > 1.3 ∴ cumple    |
| $Df_{25}=$               | 25    | m   | $\gamma_{m25}=$ 13.40 kN/m <sup>3</sup> | $FS_{25}=$ 1.2 < 1.3 ∴ no cumple |
| $Df_{30}=$               | 30    | m   | $\gamma_{m30}=$ 13.40 kN/m <sup>3</sup> | $FS_{30}=$ 0.1 < 1.3 ∴ no cumple |
| Tercer estrato drenante  |       |     |   |                                  |
| $H=$                     | 50.10 | m   | Condición                               |                                  |
| $u_{50.1}=$              | 13.20 | kPa |   |                                  |
| $Df_{30}=$               | 30    | m   | $\gamma_{m30}=$ 13.40 kN/m <sup>3</sup> | $FS_{30}=$ 20.4 > 1.3 ∴ cumple   |
| $Df_{35}=$               | 35    | m   | $\gamma_{m35}=$ 13.50 kN/m <sup>3</sup> | $FS_{35}=$ 15.4 > 1.3 ∴ cumple   |
| $Df_{40}=$               | 40    | m   | $\gamma_{m40}=$ 13.60 kN/m <sup>3</sup> | $FS_{40}=$ 10.4 > 1.3 ∴ cumple   |
| $Df_{45}=$               | 45    | m   | $\gamma_{m45}=$ 14.00 kN/m <sup>3</sup> | $FS_{45}=$ 5.4 > 1.3 ∴ cumple    |
| $Df_{49}=$               | 49    | m   | $\gamma_{m49}=$ 14.00 kN/m <sup>3</sup> | $FS_{49}=$ 1.2 < 1.3 ∴ no cumple |

Tabla 10.- Cálculo de la falla por subpresión sin abatimiento del NAF. Se evidencia la necesidad de proponer un abatimiento del nivel freático con el objetivo de evitar la falla por subpresión.

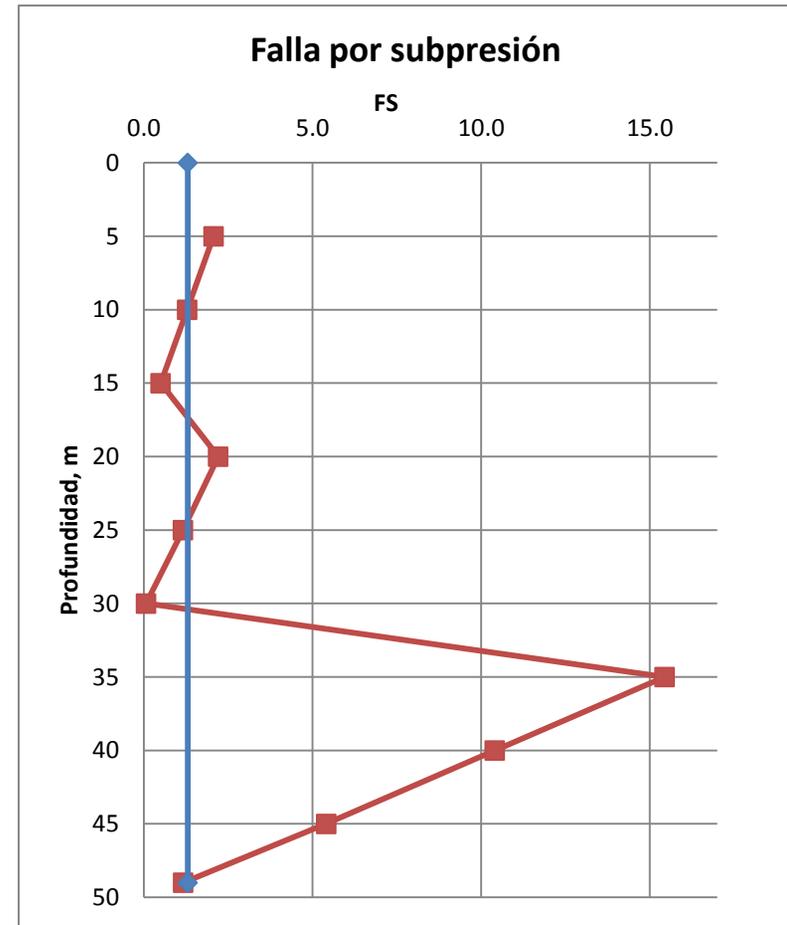


Figura 26.- Variación del factor de seguridad de falla por subpresión respecto a la profundidad.

Si ahora, se elabora la misma tabla anterior (10) pero se modifica la información de la presión de poro a como corresponde con el NAF abatido, entonces se tendrían las siguientes condiciones:

| Primer estrato drenante  |                    |      |   |                      |          |  |   |                |
|--------------------------|--------------------|------|---|----------------------|----------|--|---|----------------|
| H= 18.20 m               |                    |      |   |                      |          | Condición                                  |   |                |
| Para:                    | Df <sub>5</sub> =  | 5 m  | → | u <sub>18.2</sub> ≈  | 79.1 kPa | γ <sub>m5</sub> = 12.40 kN/m <sup>3</sup>  | FS <sub>5</sub> = 2.1                   | > 1.3 ∴ cumple |
| Para:                    | Df <sub>10</sub> = | 10 m | → | u <sub>18.2</sub> ≈  | 0 kPa    | γ <sub>m10</sub> = 12.40 kN/m <sup>3</sup> | FS <sub>10</sub> =<br>tiende a infinito | > 1.3 ∴ cumple |
| Para:                    | Df <sub>15</sub> = | 15 m | → | u <sub>18.2</sub> ≈  | 0 kPa    | γ <sub>m15</sub> = 12.30 kN/m <sup>3</sup> | FS <sub>15</sub> =<br>tiende a infinito | > 1.3 ∴ cumple |
| Segundo estrato drenante |                    |      |   |                      |          |  |   |                |
| H= 30.30 m               |                    |      |   |                      |          | Condición                                  |   |                |
| Para:                    | Df <sub>20</sub> = | 20 m | → | u <sub>30.3</sub> ≈  | 61.2 kPa | γ <sub>m20</sub> = 13.10 kN/m <sup>3</sup> | FS <sub>20</sub> = 2.2                  | > 1.3 ∴ cumple |
| Para:                    | Df <sub>25</sub> = | 25 m | → | u <sub>30.3</sub> ≈  | 0 kPa    | γ <sub>m25</sub> = 13.40 kN/m <sup>3</sup> | FS <sub>25</sub> =<br>tiende a infinito | > 1.3 ∴ cumple |
| Para:                    | Df <sub>30</sub> = | 30 m | → | u <sub>30.3</sub> ≈  | 0 kPa    | γ <sub>m30</sub> = 13.40 kN/m <sup>3</sup> | FS <sub>30</sub> =<br>tiende a infinito | > 1.3 ∴ cumple |
| Tercer estrato drenante  |                    |      |   |                      |          |  |   |                |
| H= 50.10 m               |                    |      |   |                      |          | Condición                                  |   |                |
| Para:                    | Df <sub>35</sub> = | 35 m | → | u <sub>50.10</sub> ≈ | 13.2 kPa | γ <sub>m35</sub> = 13.50 kN/m <sup>3</sup> | FS <sub>35</sub> = 15.4                 | > 1.3 ∴ cumple |
| Para:                    | Df <sub>40</sub> = | 40 m | → | u <sub>50.10</sub> ≈ | 13.2 kPa | γ <sub>m40</sub> = 13.60 kN/m <sup>3</sup> | FS <sub>40</sub> = 10.4                 | > 1.3 ∴ cumple |
| Para:                    | Df <sub>45</sub> = | 45 m | → | u <sub>50.10</sub> ≈ | 0 kPa    | γ <sub>m45</sub> = 14.00 kN/m <sup>3</sup> | FS <sub>45</sub> =<br>tiende a infinito | > 1.3 ∴ cumple |
| Para:                    | Df <sub>49</sub> = | 49 m | → | u <sub>50.10</sub> ≈ | 0 kPa    | γ <sub>m49</sub> = 14.00 kN/m <sup>3</sup> | FS <sub>49</sub> =<br>tiende a infinito | > 1.3 ∴ cumple |

**Tabla 11.- Se muestran los factores de seguridad para falla por subpresión siempre satisfactorios debido al bombeo profundo propuesto.**

- *Revisión por flotación*

La revisión por flotación se debe a la probable emersión de la lumbrera ya construida en su totalidad por encima del nivel de superficie debido a un empuje vertical ascendente producido por subpresión. En el caso de la Lumbrera 04 esta emersión es poco probable debido a los niveles de presión piezométrica tan bajos que se tienen a la profundidad de desplante de la losa de fondo. Para corroborar dicha hipótesis, se muestra el cálculo correspondiente.

$$FS = \frac{W + F_{fricc}}{F}$$

Donde:

*W* Peso total de la lumbrera con todas sus estructuras

*F<sub>fricc</sub>* Fuerza de fricción en la cara exterior del cilindro teórico que representa la lumbrera

*F* Fuerza ascendente de flotación

Se cuenta con los siguientes datos:

Diámetro interior = 13.5 m

Profundidad de desplante de muro Milán = 51.0 m

Espesor de muro Milán = 1.0 m

Diámetro exterior = 15.5 m

Peralte losa de fondo = 2.0 m

Profundidad de desplante de losa de fondo = 49.0 m

Volumen de muro Milán = 2323.1 m<sup>3</sup>

Volumen de losa = 286.3 m<sup>3</sup>

Volumen total de concreto = 2609.4 m<sup>3</sup>

Peso volumétrico del concreto = 24 kN/m<sup>3</sup>

Peso de concreto = 62625.6 kN

Área de proyección inferior de lumbrera = 188.7 m<sup>2</sup>

Presión piezométrica medida en sitio a la profundidad de desplante de losa = 13 kN/m<sup>2</sup>

Resistencia media al esfuerzo cortante del suelo = 165.7 kN/m<sup>2</sup>

Fuerza de fricción resultante de multiplicar el área del fuste por la resistencia media al esfuerzo cortante del suelo,  $F_{fricc} = 411504.2$  kN

Fuerza ascendente de flotación resultante de multiplicar el área de proyección inferior de lumbrera por la presión piezométrica medida en sitio a la profundidad de desplante de losa,  $F = 2453$  kN

Así entonces:

$$FS = 193.3 \gg 1.3 \therefore \text{cumple}$$

### **3.8.3. Modelado numérico**

Se utilizará el método del elemento finito con modelación axisimétrica para el análisis de la lumbrera. Cada uno de los estratos debe modelarse geoméricamente apegándose al Modelo Geotécnico por utilizar del cual se ha hablado ya anteriormente.

En cuanto a las propiedades físicas y mecánicas de los diversos materiales, éstas no son fijas en el tiempo sino que varían a lo largo de las distintas etapas de la vida útil de la estructura. Por ejemplo, para las condiciones iniciales se consideran las propiedades mecánicas determinadas de pruebas triaxiales tipo no consolidadas no drenadas, esto es: parámetros de resistencia al corte y módulo de elasticidad. En cambio, para el largo plazo se emplean parámetros de resistencia al corte obtenidos de pruebas triaxiales consolidadas no drenadas y para los cálculos de deformaciones, se deben hacer análisis del cambio del módulo de deformación con el tiempo, en función del nivel de esfuerzos efectivos, resultado de ensayos de consolidación.

Este tipo de herramienta representa un avance significativo en relación a los análisis convencionales que se llevaban a cabo apenas hace algunos años, en donde sólo se consideraba un estrato cuyas propiedades eran el promedio de las que tenían las capas involucradas.

En los modelos de elemento finito se pueden integrar las cargas superficiales o estructuras que pudiesen influir como: cimentaciones, otros túneles, lumbreras, pasos bajo canales, rellenos superficiales, estanques, presas, lagunas, edificaciones vecinas etc. teniendo siempre en cuenta la sobrecarga debida a maquinaria y que se cumpla la sobrecarga mínima que está estipulada en la normatividad. La presencia de estas cargas, además de su efecto directo, pudiera implicar asimetrías en sus puntos de aplicación.

Para su correcto estudio, el problema en cuestión pudiera dividirse en varios estados. Por ejemplo, en nuestro caso de construcción de la lumbrera, se pueden obtener elementos mecánicos y monitorear la distribución de esfuerzos en cada avance de excavación, cuando se construya el anillo de rigidez y cuando se construya la losa de fondo. En cada etapa se van sumando las deformaciones nuevas a las ya generadas con antelación. Cuando acabamos de dividir el procedimiento constructivo en sus diferentes etapas, tendremos un modelo que se desarrollará tomando en cuenta al tiempo, apegándose a como sucede en realidad.

## **3.9. Método del elemento finito**

### **3.9.1. Antecedentes**

El uso del Método del Elemento Finito (MEF) como herramienta de análisis y diseño cada vez toma mayor relevancia, tanto en la ingeniería geotécnica práctica como en la de investigación. La

vasta investigación que se ha desarrollado en los últimos años respecto al MEF y la capacidad de procesamiento actual de las computadoras ha hecho posible el uso de modelos numéricos avanzados que permiten, por ejemplo, el uso de elementos triangulares o poligonales de gran precisión con un número importante de nodos. El MEF está siendo aplicado con mayor frecuencia en la ingeniería geotécnica en el mundo, en especial en la Europa occidental, principalmente por dos razones (Tamez et ál. 1997):

- Mayor versatilidad para llevar a cabo el modelado de problemas complejos
- El mencionado desarrollo tecnológico acelerado

Estos modelos también permiten considerar las condiciones iniciales de esfuerzos del medio que se analiza, el uso de diferentes modelos constitutivos que se consideren más representativos del material y resolver problemas en los que se hace incidir el tiempo a modo de predicción.

Para la aplicación de los modelos avanzados es importante tener un horizonte realista de sus ventajas y alcances, de las bases teóricas de los diferentes modelos constitutivos que los conforman y de las condiciones iniciales de esfuerzos y presión de poro del medio que se analiza. Adicional a esto, es necesario recalcar si se hará un análisis a corto o largo plazo para así utilizar propiedades no drenadas o drenadas, respectivamente.

La técnica modela al medio a analizar mediante una asociación de zonas pequeñas con geometría regular conocidas con el nombre de "elementos". Los elementos están interconectados entre sí mediante puntos nodales que usualmente se encuentran ubicados en sus esquinas. Cada uno de los elementos es finito, es decir, geoméricamente definido, limitado en tamaño y en grados de libertad, de ahí proviene el nombre del método. A esta asociación de elementos comúnmente se le llama "malla de elementos finitos" (Tamez et ál. 1997).

Al estar todo interconectado mediante la malla (sin importar la cantidad de modelos constitutivos usados para los diferentes materiales) se puede saber cualquier cambio en las condiciones originales del sistema, evidenciado por un desplazamiento de los nodos del o de los elementos afectados y estos desplazamientos a su vez impactarán en el comportamiento de los elementos vecinos y así sucesivamente. Esta compleja interrelación entre los elementos interconectados hace que el tratamiento matemático sea altamente sofisticado. Después, dado que los desplazamientos en cualquier punto del elemento están relacionados con los desplazamientos en los nodos, es posible calcular los esfuerzos en el elemento a partir de las relaciones esfuerzo-deformación elegidas, por lo que los desplazamientos en los nodos son las variables fundamentales (Tamez et ál. 1997).

Un gran reto dentro de la modelación por elemento finito es la dificultad para representar fielmente las condiciones reales del problema. Ante esto una alternativa es la de recurrir a modelos bidimensionales en vez de tridimensionales y simplificar, para fines del modelado y con base en la experiencia, el procedimiento constructivo. Así como un modelo de elemento finito, ya sea bidimensional o tridimensional, arroja resultados palpables, en cualquier perspectiva, en cualquier dirección y con una presentación impecable, así también debe ser la capacitación del ingeniero que está modelando. Se deberán invertir muchas horas de capacitación y tener un equipo de cómputo con potencial por encima del promedio en cuanto a su capacidad de procesamiento así como en su capacidad para presentar y manipular gráficos (en ocasiones muy complejos y saturados de información) en pantalla.

### 3.9.2. Plaxis

Plaxis es una empresa holandesa que fabrica software que funciona con el método del elemento finito y ha sido desarrollado para el análisis de deformación y estabilidad en proyectos de ingeniería geotécnica. La familia de programas posee una interfaz gráfica limpia, con pocos botones y menús por medio de la cual se puede modelar diferentes geometrías, con diferentes materiales, con diferentes elementos estructurales, diferentes condiciones de flujo de agua y diferentes cargas. Las etapas de cálculo están completamente automatizadas y se basan en métodos numéricos complejos.

El desarrollo de Plaxis comenzó en 1987 en la Universidad de Tecnología de Delft. El propósito inicial fue el desarrollar un programa basado en el método del elemento finito de "fácil uso" en 2D para el análisis de terraplenes en los suelos blandos de Holanda. Posteriormente se extendería el uso del programa (en ese tiempo un único programa) a otras áreas de la ingeniería. En 1998 se puso a la venta el primer Plaxis 2D para ambiente Windows. Posteriormente en 2001 se comercializó el 3D Tunnel, el primer programa de la familia Plaxis en tercera dimensión. En 2004 se puso a la venta el programa 3D Foundation con la colaboración de la empresa TNO. La última aportación de la empresa es el Plaxis 3D, un programa lanzado en 2010 con todas las facilidades para modelar cualquier problema geotécnico, no necesariamente cimentaciones, ni necesariamente túneles. Actualmente la versión Plaxis 2D puede incluir módulos de simulación dinámica y de flujo de agua, como el PlaxFlow.

El programa utilizado para el presente trabajo es Plaxis 2D. A su vez, la interfaz de Plaxis 2D se divide en 3 subprogramas:

- *Input.*- es un subprograma pre-procesador que le permite al usuario definir la geometría, materiales, piezometría así como crear una malla de elemento finito, misma que puede ser autogenerada y modificada de acuerdo a las necesidades del problema (por ejemplo

hacerla más fina en aquellas partes donde se espere un mayor cambio en el estado de esfuerzos o donde se encuentren deformaciones que nos interesen desde el punto de vista de la estructura).

- *Calculations.*- en este subprograma es posible simular las etapas constructivas de la estructura y definir puntos específicos sobre el modelo a partir de los cuales se quiera generar alguna gráfica en el subprograma de *Curves*. *Calculations* es la etapa en que se llevan a cabo los cálculos de elemento finito por medio de métodos numéricos y llega a ser una parte del programa en que el usuario no interviene cuando se está llevando a cabo el análisis. El tiempo de ejecución de éste dependerá de la complejidad del modelo (refinamiento de la malla, cantidad de materiales asignados, cantidad de unidades estratigráficas, etc.) así como de la capacidad del equipo de cómputo que se esté utilizando.
- *Output.*- este subprograma es un post-procesador que es usado por el usuario para visualizar los resultados obtenidos del cálculo. Posee varias alternativas de visualización de esfuerzos y deformaciones desde diferentes secciones y desde diferentes etapas constructivas.
- *Curves.*- es una herramienta del programa que permite generar gráficas de todo tipo, carga-deformación o esfuerzo-deformación, por ejemplo. Dichas gráficas corresponden a puntos específicos del modelo indicados anteriormente en *Calculations*.

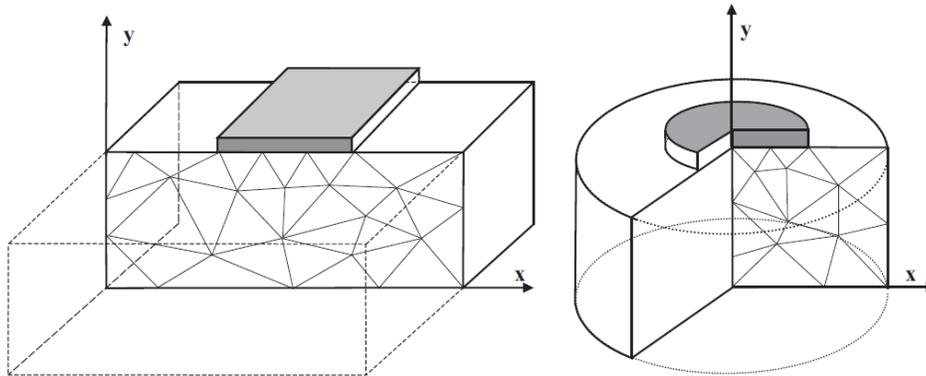
### **3.9.3. Modelado en Plaxis**

#### **3.9.3.1. Datos de entrada**

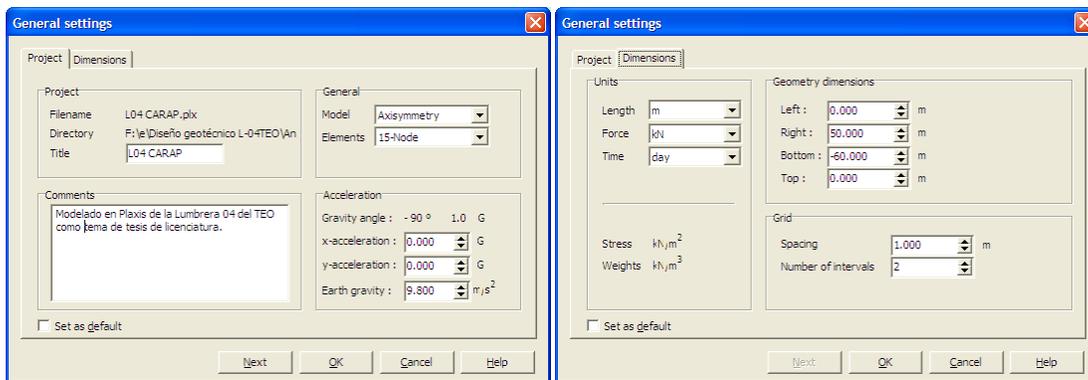
Para comenzar a introducir el modelo en Plaxis lo primero que hay que definir son algunos parámetros generales como la dirección en la que actúa la fuerza de gravedad así como la aceleración de la misma. Algunas otras características como las dimensiones que se mostrarán en pantalla deben proporcionarse al inicio, mismas que deberán ser un poco más grandes que las del modelo mismo, que posteriormente se introducirá. Respecto a las unidades fundamentales para el programa se encuentran Longitud (m), Fuerza (kN) y Tiempo (días). El programa trabaja con Sistema Internacional sin embargo, algunas unidades como los "días" en lugar de "segundos" son más convenientes para el cálculo, por ejemplo, de consolidación o en el caso de asignar permeabilidades a los materiales.

El parámetro más importante en esta etapa inicial es definir al modelo como axisimétrico y en el apartado de Elements colocar 15-Node. La razón se contrasta a continuación: cuando se usa un modelo definido como *Plane Strain Model* es porque la estructura a analizar posee una sección transversal sensiblemente uniforme y simétrica, en donde el esquema de cargas y el correspondiente estado de esfuerzos poseen una cierta distribución a lo largo de algún eje en

particular. Para modelar una zapata, por ejemplo, conviene utilizar un *Plane Strain Model*. Sin embargo, para estructuras circulares con una sección radial uniforme y un esquema de cargas y estado de esfuerzos radiales idénticos en cualquier dirección radial de la estructura, conviene entonces utilizar un *Axisymmetric Model* como en el caso de una lumbrera. En cualquiera de los dos tipos de modelos mencionados, serán únicamente dos los grados de libertad permitidos por el programa dados sus alcances 2D.



**Figura 27.- Esquemas que representan la diferencia entre utilizar un Plane Strain Model (izquierda) y un Axisymmetric Model (derecha). En ambos casos, debido a que se utilizará Plaxis 2D, entonces serán dos los grados de libertad.**



**Figura 28.- Cuadro de ajustes iniciales. Se determina un nombre al proyecto, tipo de modelo, selección de cantidad de nodos por elemento así como dimensiones de frontera y consideraciones de la malla de trabajo. También es posible modificar el valor de la aceleración debida a la fuerza de atracción de la gravedad.**

El apartado *Elements* hace referencia a cuántos nodos por elemento quiere el usuario que se utilicen. Así, un modelo donde la malla se refine muy finamente (y por lo tanto se tengan muchos más elementos que una malla medianamente fina) y además se tengan 15 nodos por elemento será un modelo muy detallado y preciso, ideal para modelos donde se quiera conocer a detalle el comportamiento del suelo y la estructura. Por otro lado, existe la posibilidad de asignar 6 nodos por triángulo, lo cual demerita el detalle pero los resultados son bastante confiables para suelos y estructuras de no mucha complejidad. El criterio para decidir entre uno y otro radica en la

cantidad de detalle que se quiera conseguir con el modelo y las capacidades del equipo de cómputo con que se cuenta.

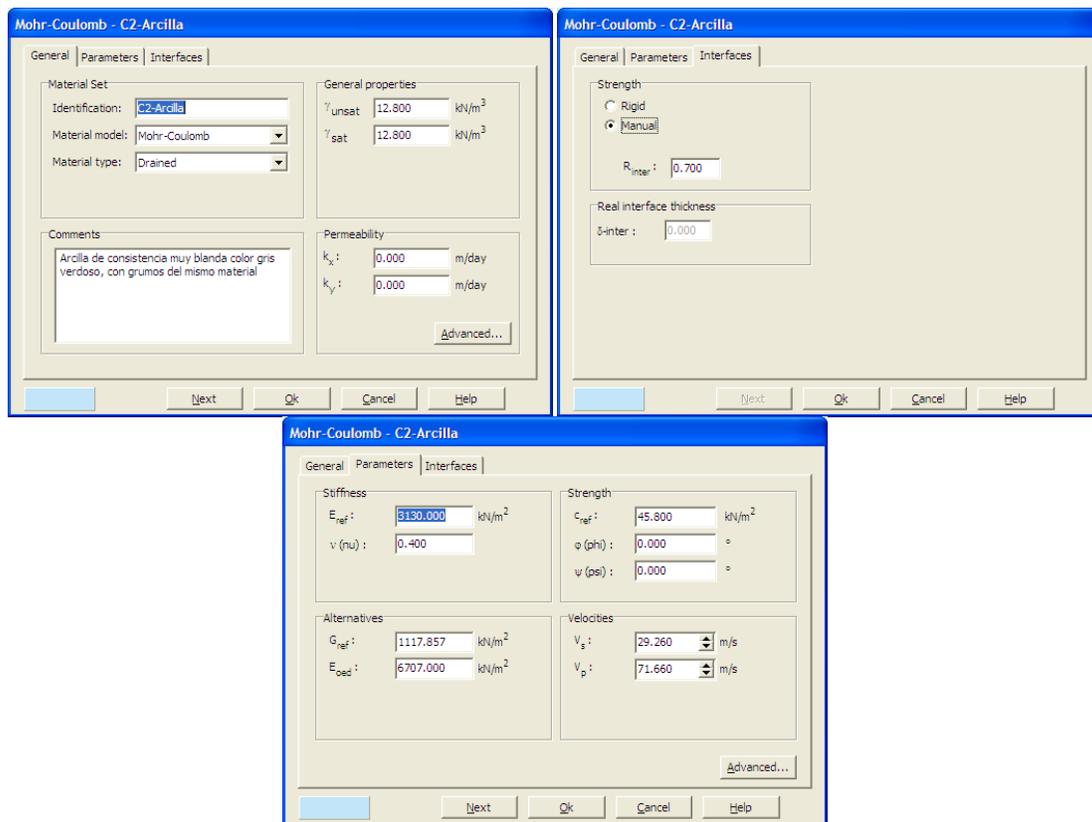
Posterior a la introducción de los datos iniciales, se definen los espesores de la estratigrafía y dimensiones del modelo geoméricamente mediante *Geometry line*. Al respecto de las dimensiones del modelo, la bibliografía recomienda que las fronteras laterales estén alejadas al menos 5 diámetros y la frontera inferior, para el caso de lumbreras, se defina a partir de la última unidad estratigráfica plasmada en el modelo geotécnico elaborado, dejando cuando menos 1 diámetro por debajo con la finalidad de no inducir errores en el cálculo debidas a la cercanía de la frontera. También, la relación largo/ancho no deberá ser menor a 3. Las recomendaciones antes hechas son eminentemente empíricas pero válidas y tienen la única limitante del equipo de cómputo que se vaya a usar.

Teniendo la estratigrafía geoméricamente definida, convendrá introducir los materiales a utilizar: suelos y concreto para los elementos placa. Primeramente los suelos. Para su introducción la pantalla que muestra Plaxis solicita datos como una identificación para el suelo, un modelo constitutivo a elegir, un tipo de material, peso volumétrico y coeficientes de permeabilidad en dirección horizontal y vertical. El modelo constitutivo finalmente es una expresión obtenida a partir de la observación experimental en donde en suelos y rocas el comportamiento esfuerzo-deformación no es precisamente lineal. Los modelos constitutivos a elegir son: *Mohr-Coulomb*, *Soft Soil Model*, *Hardening Soil Model*, *Soft Soil Creep Model*, *Jointed-Rock Model* o bien un modelo definido por el usuario. Estas relaciones tienen diferentes niveles de sofisticación y con ello se incrementa la cantidad de datos requeridos. Para el modelo de la Lumbrera 04 se utilizará el ampliamente estudiado criterio elastoplástico de Mohr-Coulomb por ser el más recomendado para conocer, a primera instancia, el comportamiento del suelo en general. Si posterior a este análisis se quisiera ahondar en algún comportamiento no precisamente normal del suelo, pudiera modificarse el modelo, refinar la malla y utilizar otro modelo constitutivo más sofisticado.

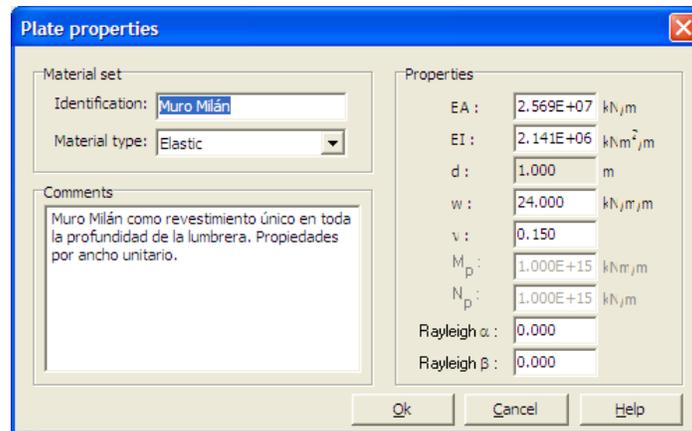
El tipo de material para los suelos puede definirse como *Drained*, *Undrained* o *Non-porous*. Los materiales drenados se utilizarán para estratos donde pueda existir un flujo de agua y para análisis a largo plazo, contrario a los no drenados donde el agua no puede fluir a través de la estructura del suelo. Así, en materiales definidos como no drenados, se generará un exceso en la presión de poro. Los materiales no porosos corresponden generalmente a elementos como las placas que, al definirse como concreto, se considera completamente impermeables. Así, el suelo será de tipo drenado.

Dentro de los parámetros a introducir para satisfacer el criterio de Mohr-Coulomb están el módulo de elasticidad, la relación de Poisson, la cohesión, el ángulo de fricción interna y el ángulo de dilatancia. Otros como el módulo de rigidez al cortante, el módulo de elasticidad edométrico y las velocidades de ondas primarias y secundarias son calculados a partir de los primeros parámetros introducidos.

En el caso de los elementos de concreto como los muros Milán y la losa de fondo, se utilizarán elementos placa que son considerados dentro del programa como elementos estructurales con resistencia a la flexión y a fuerza axial. El modelo constitutivo para este tipo de elementos es uno elástico donde las propiedades más importantes son la rigidez a flexión  $EI$  y su rigidez axial  $EA$ , ambas, definidas a partir de la resistencia del concreto y de las características geométricas de los elementos. Las propiedades para las placas se introducen por unidad de longitud.



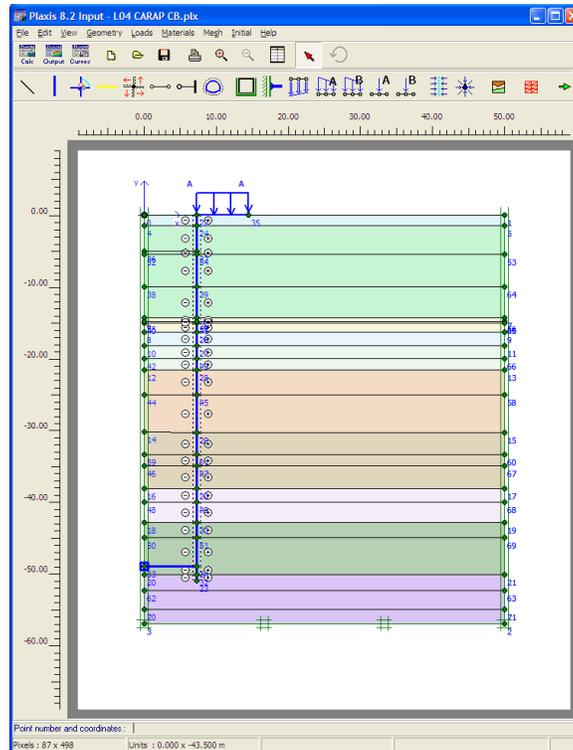
**Figura 29.- Cuadro de referencia para introducción de datos del suelo utilizando el modelo constitutivo Mohr-Coulomb.**



**Figura 30.- Pantalla para la introducción de propiedades de elementos placa. En este caso corresponde al muro Milán con un tipo de material Elástico. A la derecha de la imagen se observa la introducción de las rigideces axial y a flexión por unidad de longitud de la placa.**

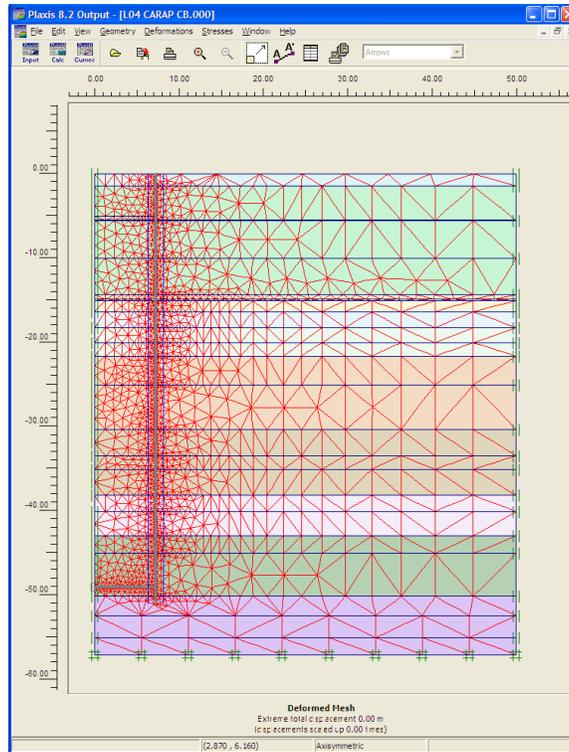
Posteriormente a cada estrato definido geoméricamente se le asignan las propiedades mecánicas correspondientes. Con la herramienta *Plate* se dibujan y simulan el muro Milán y la losa de fondo. Posterior a su colocación se les asignan también las propiedades que les correspondan.

Para terminar la conceptualización del problema de una excavación profunda, se asigna una sobrecarga de 30 kPa actuando en superficie que emule a la maquinaria que estará trabajando en las cercanías del perímetro, como las grúas. También es necesario fijar líneas horizontales dentro de la lumbrera que ayuden a simular posteriormente los avances de excavación (a cada 5.0 m) y también líneas horizontales que permitan definir cambios de pendiente en las presiones de poro cuya distribución se mostrará más adelante.



**Figura 31.- Configuración geométrica del modelo, mostrando las diferentes líneas horizontales de estratigrafía, avances de excavación y horizontes de piezometría. También se muestra la sobrecarga en superficie y las líneas de muro Milán y losa de fondo. En las fronteras del modelo se visualizan los apoyos, fijos para la parte inferior y móviles en las laterales.**

Las condiciones de apoyo en las fronteras del modelo se asignarán automáticamente como apoyos fijos en la frontera inferior y móviles en las fronteras laterales, es decir, que permiten el movimiento en dirección vertical pero no horizontal. Posteriormente se debe crear la malla de elementos finitos y refinarla en las partes donde más importe precisar la información que arroje el programa, esto es, en los muros Milán y en la losa de fondo. El refinamiento de la malla hará que haya una concentración y disposición diferente de los elementos finitos en las cercanías de los muros y losa y que conforme se alejan, se hagan más grandes y con un acomodo menos cuidadoso.



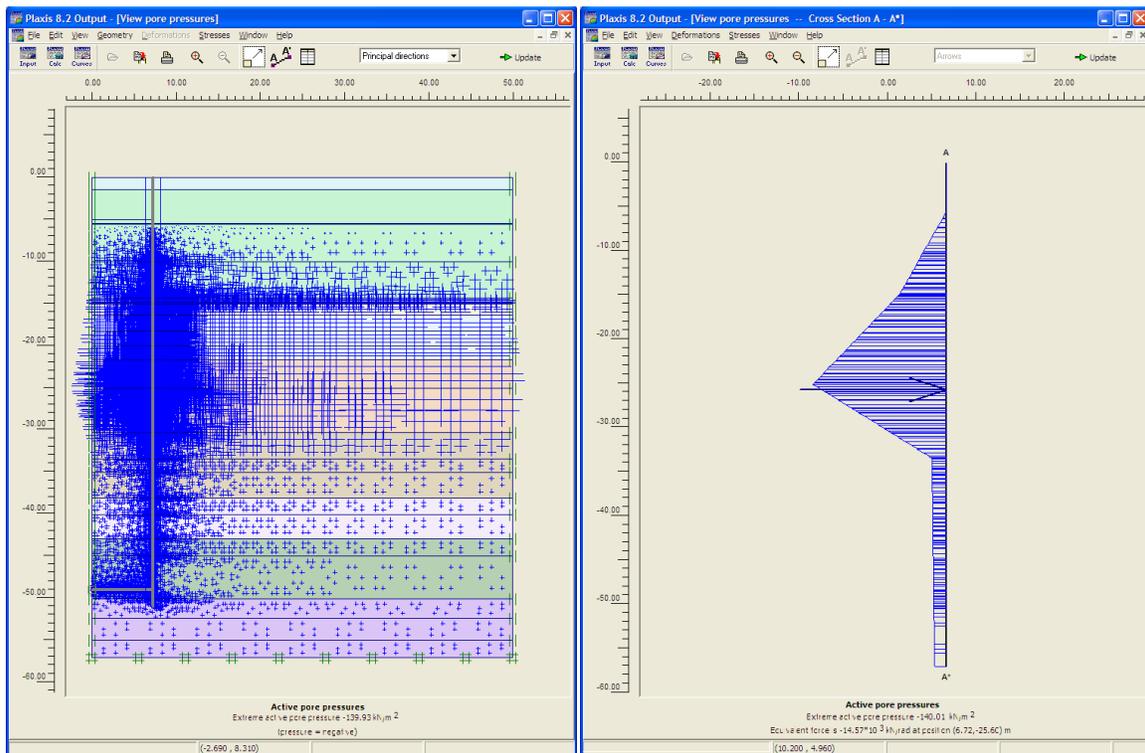
**Figura 32.- Malla generada para el análisis por elemento finito. Se aprecia el refinamiento de la malla en zonas cercanas tanto a muro Milán como a losa de fondo, que son lugares donde interesa darle un seguimiento detallado a deformaciones y esfuerzos. Por su parte, se aprecian también zonas donde el mallado es grueso y regular, cerca de la frontera derecha del modelo, por ejemplo, debido a que es una zona lejana a la de interés. Se pudiera conformar una malla igualmente precisa en su totalidad, sin embargo los recursos que solicitará el modelo a la computadora serán mayores y por ende, el tiempo de análisis.**

Una vez definida la malla habrá que definir las condiciones iniciales, es decir, definir la piezometría que se tenga en el sitio de construcción y corroborar que la condición de esfuerzos iniciales sea la correcta, ya que el  $K_0$  (superficie plana y por lo tanto aplicable) se calcula a partir del ángulo de fricción interna de cada estrato. El NAF fue encontrado a 5.48 m de profundidad y la piezometría medida se reporta en la siguiente tabla.

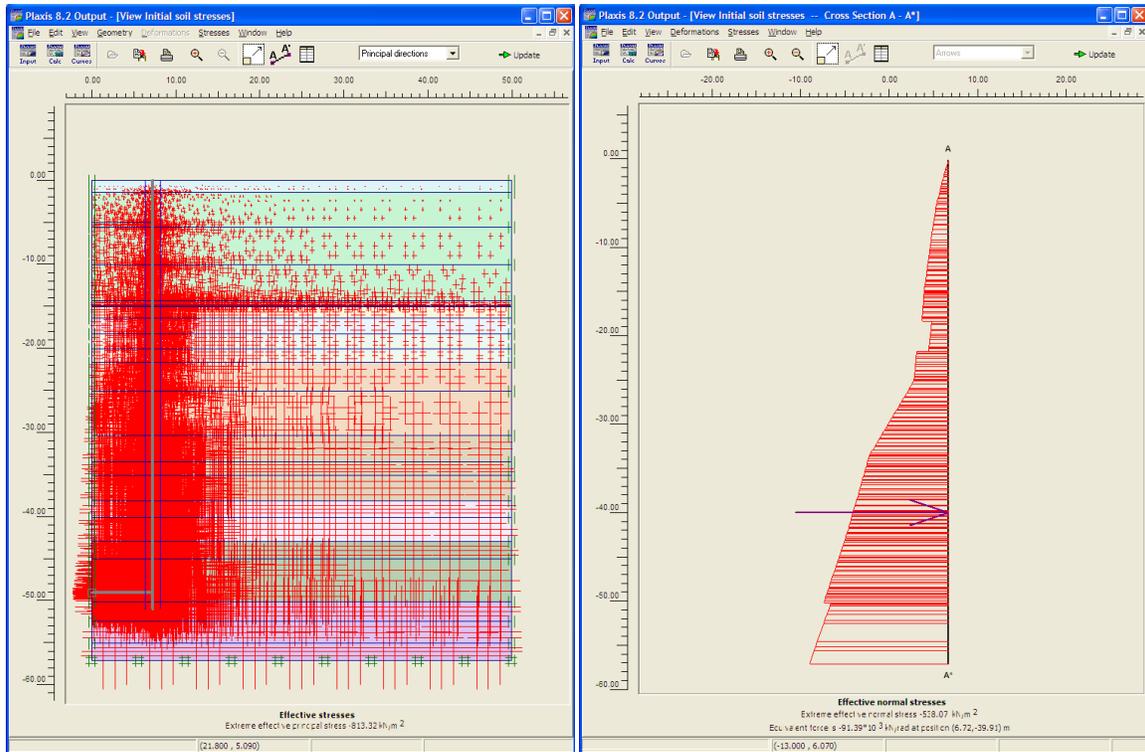
| Profundidad de instalación (m) | Presión de poro (kPa) |
|--------------------------------|-----------------------|
| 5.48                           | 0                     |
| 14.83                          | 49                    |
| 25.00                          | 140                   |
| 33.41                          | 15                    |
| 52.37                          | 13                    |

**Tabla 12.- Piezometría medida en sitio**

Para introducir la piezometría es necesario trazar la curva con los datos medidos e identificar las profundidades a las que se dan cambios de pendiente. La piezometría se genera como definida por el usuario dado que precisamente se tiene esta información, por lo cual la colocación del nivel freático (como lo sugiere el programa mismo) no es necesaria. La definición se hace a partir de una presión piezométrica ( $p_{ref}$ ) a una determinada profundidad de referencia ( $y_{ref}$ ) y cuál es el cambio conforme la profundidad se incrementa (a modo de gradiente,  $p_{inc}$ ). Así, es posible definir la presión de poro con sus variantes tal y como se reporta desde campo. La piezometría introducida y graficada en Plaxis y la variación con la profundidad de los esfuerzos efectivos se presentan en las siguientes figuras:

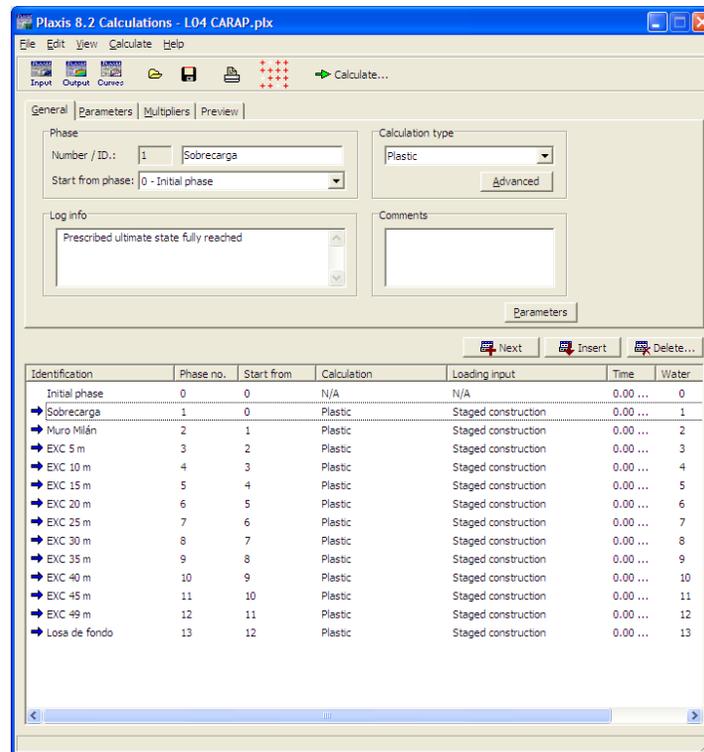


**Figura 33.- Variación de la piezometría conforme la profundidad. Cortes perpendiculares hechos sobre el modelo de acuerdo a lo reportado en la Tabla 12.**



**Figura 34.- Variación de los esfuerzos efectivos, tanto verticales como normales mostrados en dos cortes perpendiculares.**

Las ventanas que muestran resultados como la configuración de la malla, la piezometría y los esfuerzos efectivos pertenecen al subprograma de *Output*. La siguiente fase de análisis es definir las etapas constructivas, es decir, los avances de excavación del núcleo de la lumbrera a cada 5 m. Esta definición se hace en el subprograma *Calculations* con el cual cuenta con diversas opciones de análisis (mismos que serán mencionados más adelante) para el caso de la Lo<sub>4</sub> será análisis plástico. La ventana del programa una vez realizada toda la cronología de la excavación se muestra a continuación.



**Figura 35.- Ventana del subprograma Calculations donde es posible definir las etapas constructivas.**

### 3.9.3.2. Tipos de análisis

Dentro del subprograma Calculations es posible definir para cada etapa constructiva un tipo específico de análisis: Plastic calculation (análisis plástico), Consolidation analysis (análisis de consolidación), Phi-c reduction safety analysis (análisis con reducción de Phi-c) y Dynamic analysis (análisis dinámico).

El Análisis Plástico se puede utilizar ampliamente para la mayoría de las aplicaciones prácticas geotécnicas debido a que realiza un análisis de deformación elasto-plástica, lo cual se ajusta a la mayoría de las consideraciones hechas en estos tipos de modelo. Este análisis no toma en cuenta los efectos del tiempo aunque, si se elige definir a todo el modelo con materiales drenados, entonces, y a pesar de que no es un análisis de consolidación, los asentamientos calculados se asemejarán a los de largo plazo. El Análisis Plástico no toma en cuenta los efectos del tiempo excepto cuando en el suelo se utiliza el modelo constitutivo *Soft Soil Creep*, el cual al basarse en una viscoplasticidad necesariamente toma en cuenta el comportamiento del suelo a través del tiempo.

El Análisis de Consolidación es útil cuando se quiere dar seguimiento a la disipación del exceso de presión de poro a través del tiempo en suelos cohesivos saturados. Los asentamientos calculados

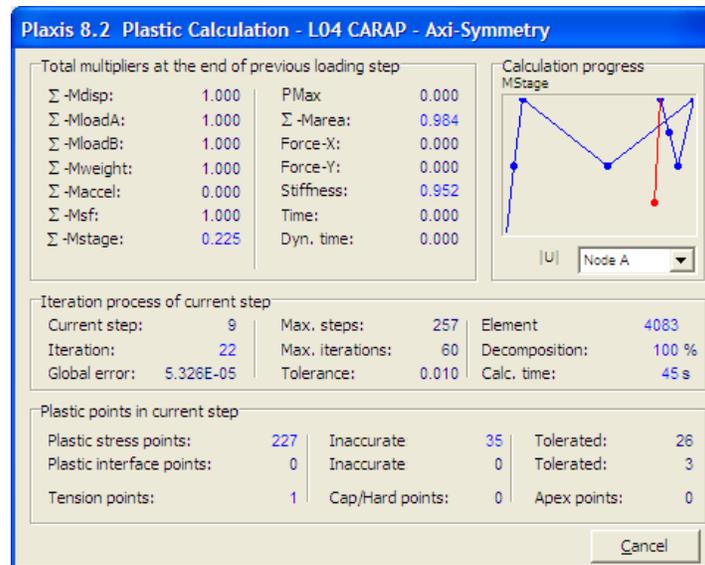
con este tipo de análisis pueden representar fielmente a los esperados al final de un periodo de tiempo definido.

Un Análisis con reducción de  $\Phi$ -c lo que ejecuta es una reducción de los parámetros de resistencia del suelo y el resultado de este análisis aporta un factor de seguridad global para el modelo en la etapa constructiva en cuestión. Generalmente para hacer un análisis de este tipo, se opta por generar una etapa constructiva posterior a haber realizado para esa misma etapa otro tipo de análisis, uno Plástico, por ejemplo. Por pertenecer a filosofías diferentes, los factores de seguridad en Plaxis respecto a los reportados por los modelos de equilibrio límite no pueden compararse directamente, aunque sí pueden complementarse en aras de la seguridad. En ciertos casos, los factores de seguridad de métodos analíticos pudieran ser satisfactorios cuando los de Plaxis no, eso quiere decir que el problema de estabilidad o de falla del suelo no se está dando justo en la zona de representación del método analítico, sino en otra parte del modelo. Por el contrario, cuando los factores de Plaxis resultan satisfactorios pero los de métodos analíticos no, entonces habrá que revisar las consideraciones hechas para ambos modelos porque por lo general, cuando los factores de Plaxis son satisfactorios, quiere decir que para cualquier parte del modelo lo son, no así los factores de los métodos analíticos, que se refieren a una parte en específico del modelo.

El Análisis Dinámico (el cual se oferta como un complemento adicional al programa) consiste en considerar vibraciones en el suelo y monitorear su influencia en estructuras vecinas, siendo un caso típico el análisis por sismo y la representación de fenómenos como el de licuación.

### **3.9.3.3. Obtención de resultados**

Una vez definido geoméricamente el modelo, que ya se ha elegido el modelo constitutivo de los materiales, se ha introducido la piezometría y se han definido las etapas constructivas así como el tipo de análisis de cada una de éstas, se ejecuta el análisis mediante *Calculations* para posteriormente visualizar, por medio de *Output* la gama de resultados disponibles.



**Figura 36.- Pantalla del subprograma Calculations durante el análisis de una de las etapas constructivas.**

### 3.10. Resultados del análisis

Los resultados propios del análisis conllevan el monitoreo de los asentamientos en superficie por cada etapa constructiva, las expansiones en el fondo de la excavación también por cada etapa, los movimientos de muro Milán, losa de fondo y también los elementos mecánicos que se presentarán en muro y losa.

En el caso de la Lumbra 04, el Estado de México no cuenta con un Reglamento de Construcciones propio ni Normas Técnicas, por lo cual las bases de diseño del proyecto señalan como referencia el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal y sus Normas Técnicas Complementarias.

Para el caso de asentamientos en superficie, el valor medio dentro del terreno de construcción no debe rebasar los 15 cm cuando se presenten estructuras colindantes y los 30 cm cuando el terreno de construcción esté aislado, ambos valores, únicamente para las zonas II y III de acuerdo a la zonificación geotécnica de la Ciudad de México propuesta en las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones del RCDF 2004. Así, al estar la Lumbra 04 en la zona II y ser una construcción aislada, el asentamiento máximo en superficie permisible de 30 cm no es rebasado.

| Etapa         | Asentamiento (cm) | Condición RCDF 04 |
|---------------|-------------------|-------------------|
| Initial phase | 0.00              | Aceptable         |
| Sobrecarga    | 4.50              | Aceptable         |
| Muro Milán    | 5.37              | Aceptable         |
| EXC 5 m       | 5.86              | Aceptable         |
| EXC 10 m      | 7.36              | Aceptable         |
| EXC 15 m      | 9.08              | Aceptable         |
| EXC 20 m      | 11.56             | Aceptable         |
| EXC 25 m      | 11.84             | Aceptable         |
| EXC 30 m      | 11.95             | Aceptable         |
| EXC 35 m      | 12.10             | Aceptable         |
| EXC 40 m      | 12.32             | Aceptable         |
| EXC 45 m      | 12.50             | Aceptable         |
| EXC 49 m      | 12.74             | Aceptable         |
| Losa de fondo | 12.81             | Aceptable         |

Tabla 13.- Cuantificación de los asentamientos en superficie para las diferentes etapas constructivas.

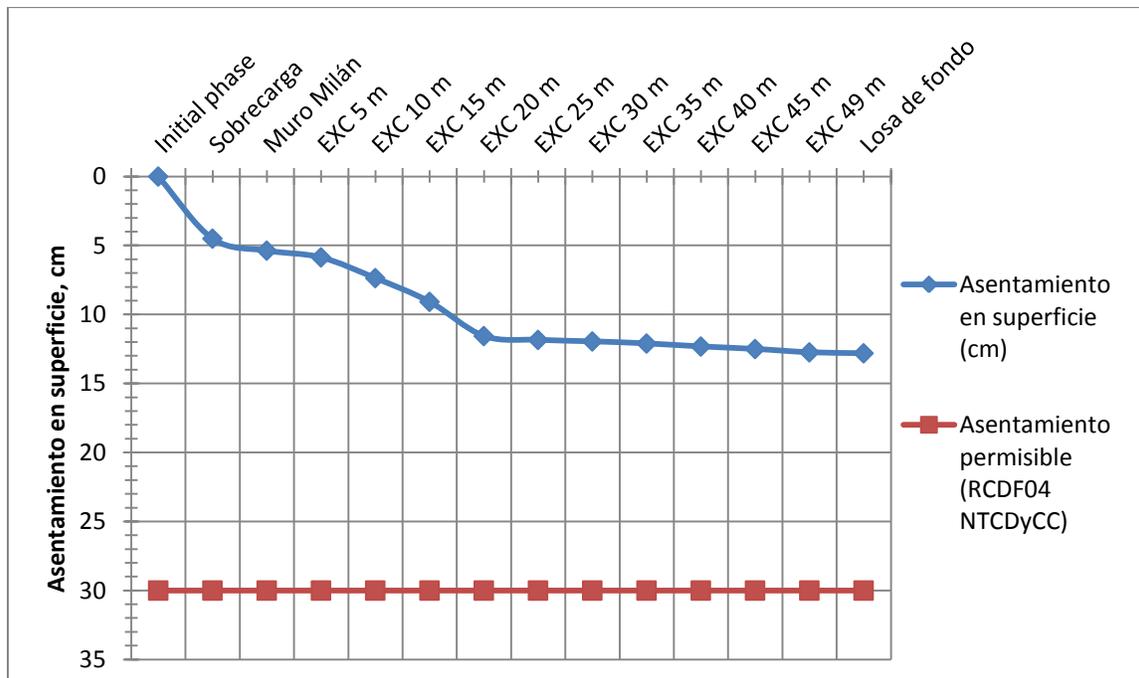


Figura 37.- Representación gráfica de los asentamientos calculados comparados con el permisible de acuerdo al RCDF04.

Expansiones elásticas en el fondo de excavación por cada etapa constructiva:

| Etapa         | Expansión en el fondo de la excavación (cm) | Condición RCDF 04 |
|---------------|---|-------------------|
| Initial phase | -   | -                 |
| Sobrecarga    | -   | -                 |
| Muro Milán    | -   | -                 |
| EXC 5 m       | 1.22  | Aceptable         |
| EXC 10 m      | 4.81  | Aceptable         |
| EXC 15 m      | 7.41  | Aceptable         |
| EXC 20 m      | 8.76  | Aceptable         |
| EXC 25 m      | 13.14                                       | Aceptable         |
| EXC 30 m      | 12.07                                       | Aceptable         |
| EXC 35 m      | 14.49                                       | Aceptable         |
| EXC 40 m      | 15.23                                       | Aceptable         |
| EXC 45 m      | 11.69                                       | Aceptable         |
| EXC 49 m      | 5.03  | Aceptable         |
| Losa de fondo | -   | -                 |

Tabla 14.- Cuantificación de las expansiones en el fondo de la excavación por etapa constructiva.

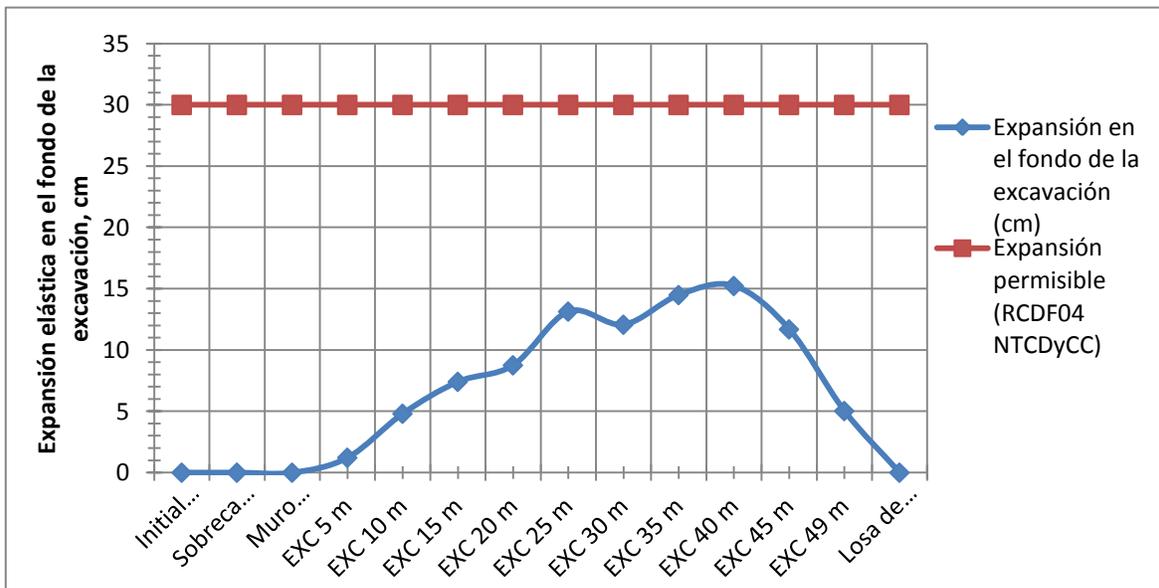


Figura 38.- Representación gráfica de las expansiones en el fondo de la excavación comparadas con el permisible de acuerdo al RCDF 04.

Elementos mecánicos máximos en los elementos estructurales:

| Elemento      | Elementos mecánicos máximos |                 |                     |
|---------------|-----------------------------|-----------------|---------------------|
|               | Fuerza axial                | Fuerza cortante | Momento flexionante |
|               | (kN/m)                      | (kN/m)          | (kN·m/m)            |
| Muro Milán    | -1465.49                    | 148.27          | -179.15             |
| Losa de fondo | 11.08                       | 101.89          | 192.26              |

**Tabla 15.- Elementos mecánicos máximos sobre elementos estructurales**

Los desplazamientos máximos en muro Milán y Losa de fondo se harán con base en las siguientes consideraciones: a) un tablero de muro Milán con dimensiones de 1.0 m (espesor) y 1.0 m de ancho con 51.0 m de longitud, pudiera ser analizado como una viga en voladizo con la correspondiente obtención de deflexiones permisibles de acuerdo al RCDFo<sub>4</sub>; b) respecto a la losa, se analizará la deflexión máxima permisible de ésta al centro y se comparará con los resultados obtenidos en Plaxis.

| Elemento      | Desplazamiento máximo (cm) | Desplazamiento           | Condición RCDF o <sub>4</sub> |
|---------------|----------------------------|--------------------------|-------------------------------|
|               |                            | máximo permisible        |                               |
|               |                            | RCDF o <sub>4</sub> (cm) |                               |
| Muro Milán    | 0.28 (horizontal)          | 41.0 (horizontal)        | Aceptable                     |
| Losa de fondo | 4.86 (vertical)            | 6.1 (vertical)           | Aceptable                     |

**Tabla 16.- Comparación de los desplazamientos máximos horizontales (muro Milán) y verticales (losa de fondo) contra los máximos permisibles de acuerdo al RCDF 04.**

### 3.10.1. Comparación de los métodos analíticos con el modelado numérico

La comparación de factores de seguridad de los métodos analíticos respecto a los de un modelado numérico (específicamente de Plaxis mediante un análisis de Reducción de parámetros de resistencia) pudieran parecer directamente comparables, sin embargo no lo son del todo.

En un método analítico, lo que se estudia es una zona determinada de un todo, es decir, no toma en cuenta todo el modelo sino únicamente la parte en la que se quiere estudiar la estabilidad. Así, dichos factores de seguridad están ampliamente referenciados a un mecanismo de falla específico (falla de fondo, subpresión, estabilidad de la zanja para muro Milán, etc.). El factor de

seguridad para un método analítico es el cociente de las fuerzas que resisten sobre las fuerzas que actúan, de ahí el hecho de que los FS calculados sean, necesariamente, mayores que 1.0. Para poder evaluar la estabilidad de una excavación por métodos analíticos, es necesario hacer más consideraciones de materiales y geometría comparativamente con algún método numérico,

En Plaxis, el concepto de factor de seguridad mediante un análisis de Reducción de parámetros de resistencia es diferente. El factor de seguridad se obtiene de una relación de la "resistencia introducida" por el usuario respecto a la "resistencia reducida" por Plaxis. La resistencia introducida es la que se define desde el Modelo Geotécnico proveniente de la campaña de exploración geotécnica. La resistencia reducida es un proceso gradual que Plaxis lleva a cabo en un número determinado de pasos adicionales y también en un decremento de la resistencia dados. Tanto el número de pasos como el decremento de la resistencia puede ser definido por el usuario. El factor de seguridad, además, se plantea para la totalidad del modelo, es decir, no de una zona en específico.

Se puede prever, entonces, que dichos valores no son comparables.

A continuación se presentan 2 tablas donde se muestran los resultados de factores de seguridad obtenidos tanto por métodos analíticos como por el modelado numérico. Para el caso de la tabla de métodos analíticos, es un resumen de los análisis presentados en el apartado 3.8.2. Para el caso de la tabla de modelado numérico, es la extracción de los resultados obtenidos mediante el análisis con Reducción de parámetros de resistencia.

| Análisis                             | Prof. de análisis (m) | FS         | FS <sub>min</sub> | Condición  |
|--------------------------------------|-----------------------|------------|-------------------|--|
| Estabilidad de zanja para muro Milán | 51 m                  | 2.2        | 1.5               | Cumple   |
| Falla de fondo                       | 49 m                  | 2.1        | 1.7               | Cumple.  |
| Falla por subpresión                 |                       | Sin bombeo | Con bombeo2       | Para el caso sin bombeo profundo, al acercarse la excavación a las profundidades donde comienzan los diferentes estratos drenantes, el FS se vuelve no aceptable, lo que justifica el uso de un sistema de bombeo profundo como el propuesto, modificando los valores no aceptables a permisibles. |
|                                      | 5 m                   | 2.1        | .1                |  |
|                                      | 10 m                  | 1.3        | >>1.3             |  |
|                                      | 15 m                  | 0.5        | >>1.3             |  |
|                                      | 20 m                  | 2.2        | 2.2               |  |
|                                      | 25 m                  | 1.2        | >>1.3             |  |
|                                      | 30 m                  | 20.4       | >>1.3             |  |
|                                      | 35 m                  | 15.4       | 15.4              |  |
|                                      | 40 m                  | 10.4       | 10.4              |  |
|                                      | 45 m                  | 5.4        | >>1.3             |  |
| 49 m                                 | 1.2                   | >>1.3      |                   |  |
| Revisión por flotación               | Lumbrera terminada    | 193        | 1.3               | Cumple sobradamente.   |
| Avance sin soporte                   | -                     | -          | -                 | No aplica debido a que se cuenta con el soporte del muro Milán en toda la profundidad.   |
| Falla por extrusión                  | -                     | -          | -                 | No aplica debido a que se cuenta con el soporte del muro Milán en toda la profundidad.   |
| Falla por pateo                      | -                     | -          | -                 | No aplica debido al arreglo anular de los muros Milán.   |

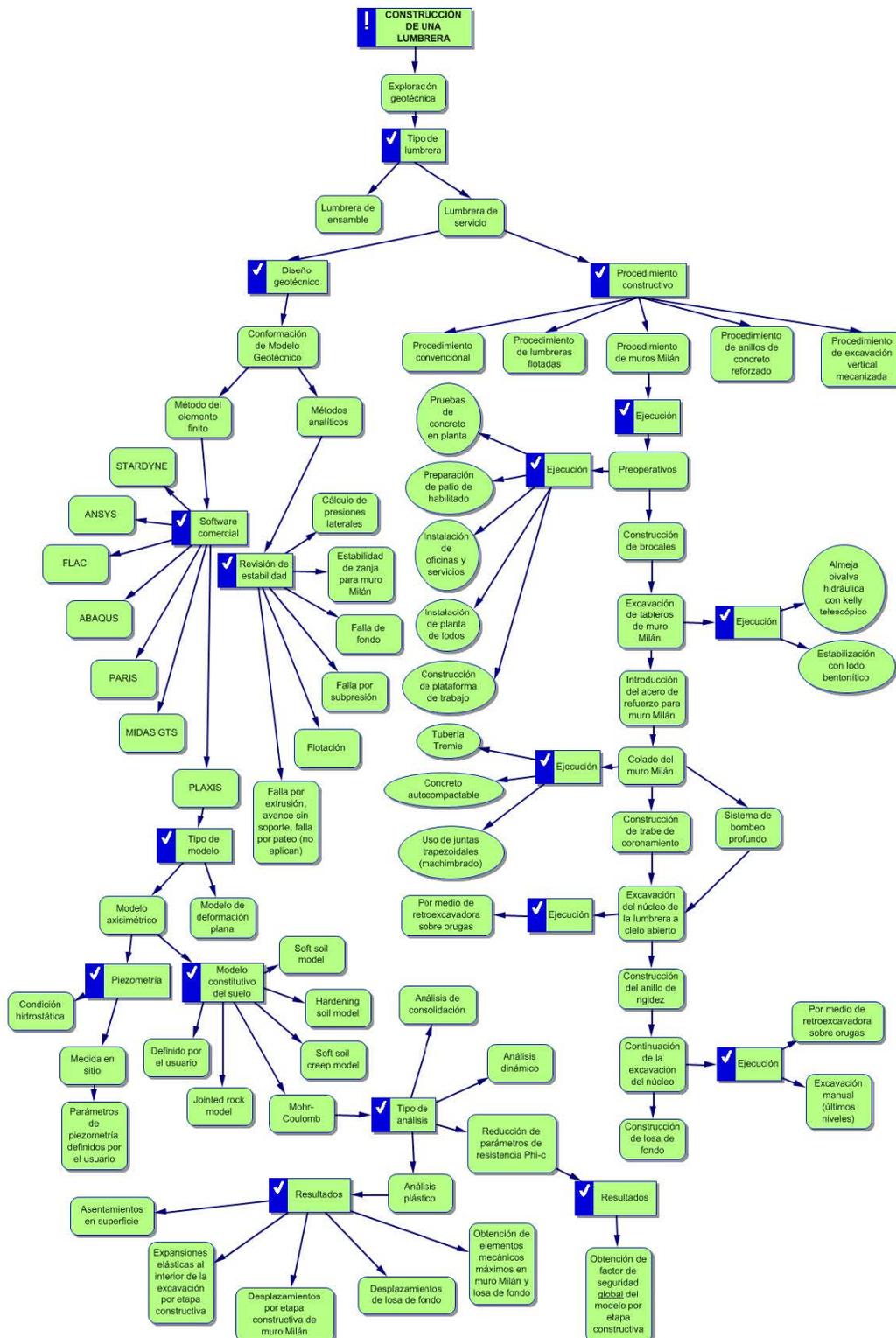
**Tabla 17.- Tabla resumen con los factores de seguridad obtenidos por métodos analíticos.**

| Etapa constructiva | FS <sub>GLOBAL</sub> |
|--------------------|----------------------|
| Condición inicial  | -                    |
| Sobrecarga         | -                    |
| Muro Milán         | -                    |
| Exc @ 5 m          | 7.2                  |
| Exc @ 10 m         | 7.7                  |
| Exc @ 15 m         | 7.9                  |
| Exc @ 20 m         | 7.9                  |
| Exc @ 25 m         | 7.9                  |
| Exc @ 30 m         | 7.9                  |
| Exc @ 35 m         | 7.2                  |
| Exc @ 40 m         | 7.2                  |
| Exc @ 45 m         | 7.2                  |
| Exc @ 49 m         | 5.5                  |
| Losa de fondo      | 7.3                  |

**Tabla 18.- Factores de seguridad globales obtenidos por medio de un análisis de Reducción de parámetros de resistencia en Plaxis.**

#### 4. Árbol resumen de resultados

##### 4.1. Elección de método, tipo particular de procedimiento constructivo, modelo constitutivo elegido, análisis realizado, etcétera.



## 5. Conclusiones

El diseño geotécnico de lumbreras es una actividad que debe llevarse a la par de un diseño estructural, teniendo siempre en cuenta las condiciones en obra que por lo general son diferentes a las idealizaciones hechas en gabinete.

El avance acelerado en la tecnología permite desarrollar modelos que cada vez contemplen menos consideraciones y se acerquen más a la realidad, aunque también es cierto que este progreso acelerado tiene su contrapunto, dejando a personas que tengan una buena percepción de la computación la ejecución de un modelo numérico, pasando a segundo plano su grado de instrucción geotécnica. De ahí la importancia que se reconozcan ampliamente las posibilidades, limitaciones e inclusive salvedades y ventajas de la utilización de un software.

Los métodos analíticos han sido desde hace décadas indicadores claros sobre la estabilidad local de un mecanismo de falla identificado. Si bien para realizar un cálculo por métodos analíticos se hacen diferentes consideraciones y se aplican ciertos factores que lo alejan de la realidad, lo cierto es que proporcionan un número "grueso" rápidamente lo que sin duda, es útil. Así lo ha sido y seguramente lo seguirá siendo.

Para el caso de la Lo<sub>4</sub>, un aspecto fundamental y que es el eje rector del diseño de la excavación del núcleo es el sistema de bombeo profundo junto con el bombeo de achique. Durante la medición de la piezometría se comprobó que existía una zona (alrededor de los 30 m) donde la presión del agua influía negativamente sobre el fondo de la excavación, reduciendo los factores de seguridad. El bombeo lo que proporciona es un suelo "seco", endurecido y que temporalmente durante la construcción de la obra es útil para garantizar la seguridad.

La exploración geotécnica en su etapa de ingeniería básica y posteriormente en la campaña de exploración complementaria representa toda la información que el ingeniero de diseño debe sintetizar, discriminar y decidir sobre las propiedades que son sujetas a una agrupación para la conformación del Modelo Geotécnico, documento a partir del cual se hará cualquier cálculo geotécnico posterior. En este trabajo se hizo hincapié sobre la vital importancia que tiene para el proyecto la adecuada conformación de un Modelo Geotécnico.

La inversión adecuada en exploración y diseño hacen que, como en cualquier otra obra, se llegue a resultados aceptables en periodos de tiempo establecidos y con la calidad adecuada. Uno de los principales problemas es cuando se tiende a "ahorrar" en estas primeras etapas, dejando todo a la construcción física, siendo entonces cuando en campo se reportan condiciones diferentes a las consideradas y entonces es necesario hacer exploración geotécnica adicional, rediseño de elementos, rediseño geotécnico y por ende, un atraso en el proceso que desde el principio debió

marchar en tiempo. Todo lo anterior con el consecuente incremento en el costo y en el tiempo de entrega. Ahorrar en las etapas de exploración y diseño, es un ahorro mal entendido.

## 6. Referencias

Aguilar, M. et ál. *The new Mexico City deep sewerage system*. Presentado en: 7th International Symposium: geotechnical aspects of underground construction in soft ground (Roma, Italia). 2011.

Alberto, Y. 2010. *Anexo III. Análisis con elementos finitos (Plaxis) Lumbreira 04* TEO-1-L-04-AG-CL-A3, COMISSA, México.

Alonso, A. 2009. *Guía de cimentaciones en obras de carretera*, Dirección General de Carreteras, Ministerio de Fomento, Gobierno de España, España.

Auvinet, G. et ál. *Análisis, diseño, construcción y comportamiento de obras subterráneas en suelos*. En: XXV Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica (2010, Acapulco, Guerrero. México.) Memoria Técnica, Vol. I. SMIG, México D.F., 2010.

Benitez, A. et ál. 2009. *Análisis y memoria de cálculo geotécnico Lumbreira 04* TEO-1-L-04-AG-CL, COMISSA, México.

Brinkgreve, R. et ál. 2010. *Plaxis 2D 2010 General Information*, Delft University of Technology & Plaxis bv, Países Bajos.

Brinkgreve, R. et ál. 2010. *Plaxis Material Models Manual 20*, Delft University of Technology & Plaxis bv, Países Bajos.

Brinkgreve, R. et ál. 2010. *Plaxis 2D Reference Manual 2010*, Delft University of Technology & Plaxis bv, Países Bajos.

Castillo, T. 2009. *Análisis y memoria de cálculo geotécnico Lumbreira 04* TEO-1-L-04-AG-CL, COMISSA, México.

Castillo, T. 2009. *Bases de diseño. Criterios de diseño para Lumbreira L-04* TEO-1-L-04-BD-CL, COMISSA, México.

Castillo, T. 2009. *Modelo geotécnico Lumbreira 04* TEO-1-L-04-MG-CL, COMISSA, México.

Clavellina, J. et ál. *Análisis con MEF de secuencias de excavación en lumbreras*. En: XXV Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica (2010, Acapulco, Guerrero. México.) Memoria Técnica, Vol. III. SMIG, México D.F., 2010.

Comisión Nacional del Agua. 2008. **Programa de sustentabilidad hídrica de la cuenca del valle de México**, CONAGUA, México.

Comisión Nacional del Agua. 2008. **Sistema de drenaje de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM)**, CONAGUA, México.

Comisión Nacional del Agua, 2011. **Programa de sustentabilidad hídrica del Valle del México. Túnel Emisor Oriente**, disponible en:  
[www.conagua.gob.mx](http://www.conagua.gob.mx)

Contreras, R. et ál. **Propuesta conceptual para la construcción de lumbreras del Túnel Emisor Oriente**. En: Simposio sobre túneles y lumbreras en suelos y rocas (2010, Ciudad de México, México.) Memoria Técnica, SMIG-AMITOS, México D.F., 2010.

Gobierno del Distrito Federal. 2004. **Reglamento de construcciones del Distrito Federal. Normas Técnicas Complementarias para el diseño y ejecución de obras e instalaciones hidráulicas**, México.

Gobierno del Distrito Federal. 2004. **Reglamento de construcciones del Distrito Federal. Normas Técnicas Complementarias para diseño y construcción de cimentaciones**, México.

Herrenknecht, 2011. **Herrenknecht VSM9600 Shaft Enlargement**, disponible en:  
[www.herrenknecht.de](http://www.herrenknecht.de)

Herrenknecht, 2011. **Mechanized tunnelling supports restructuring of the Emscher**, disponible en: [www.herrenknecht.de](http://www.herrenknecht.de)

Herrenknecht, 2011. **Mechanized shaft construction for more safety in metro Line 1**, disponible en: [www.herrenknecht.de](http://www.herrenknecht.de)

Holguín, E. et ál. **Lumbreras profundas de gran diámetro en suelos de origen lacustre**. En: Simposio sobre túneles y lumbreras en suelos y rocas (2010, Ciudad de México, México.) Memoria Técnica, SMIG-AMITOS, México D.F., 2010.

Juárez, M et ál. **Caracterización geotécnica del subsuelo a lo largo del Túnel Emisor Oriente**. En: Simposio sobre túneles y lumbreras en suelos y rocas (2010, Ciudad de México, México.) Memoria Técnica, SMIG-AMITOS, México D.F., 2010.

Luna, O. **Consideraciones generales en la ingeniería geotécnica de túneles y lumbreras**. En: Simposio sobre túneles y lumbreras en suelos y rocas (2010, Ciudad de México, México.) Memoria Técnica, SMIG-AMITOS, México D.F., 2010.

Lunardi, P. 2008. **Design and construction of tunnels**, Springer, Leipzig, Alemania.

Méndez, R. et ál. 2009. **Procedimiento constructivo Lumbrera 04** TEO-1-L-04-PC-CL, COMISSA, México.

Mondragón, D. 2009. **Anexo III. Análisis con elementos finitos (Plaxis) Lumbrera 04** TEO-1-L-04-AG-CL, COMISSA, México.

Monroy-Salgado, R. et ál. **Mejoramiento de suelo con jet grouting para túneles de interconexión**. En: XXV Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica (2010, Acapulco, Guerrero. México.) Memoria Técnica, Vol. I. SMIG, México D.F., 2010.

Mooser, F. 2009. **Geología del Túnel Emisor Oriente** TEO-1/6-T/L-GEO, COMISSA, México.

Mooser, F. 2009. **Interpretación geológica de sondeos**, Plano con clave TEO-1/6-TL-00/PS-GT-01, COMISSA, México.

Mooser, F. 2009. **Levantamiento superficial geológico 1/2**, Plano con clave TEO-1/6-L-00/PS-GT-01, COMISSA, México.

Neri, L. 2009. **Especificaciones para muro Milán Lumbrera 04** TEO-1-L-04-EC-MM, COMISSA, México.

Neri, L. 2009. **Especificaciones técnicas generales para Lumbrera 04** TEO-1-L-04-EC-CL, COMISSA, México.

Orduño, V. et ál. **Confiabilidad de lumbreras realizadas por el método de flotación**. En: XXV Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica (2010, Acapulco, Guerrero. México.) Memoria Técnica. SMIG, México D.F., 2010.

Paniagua, W. Editor. 2002. **Manual de construcción geotécnica Tomos I y II**, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos SMMS, México.

Presidencia de la República, 2011. **Megaobras: infografías del Túnel Emisor Oriente**, disponible en:

[www.presidencia.gob.mx](http://www.presidencia.gob.mx)

Rangel, J. 2010. **Memoria de cálculo geotécnico del mejoramiento en la entrada y salida de los portales de Lumbraera 04** TEO-1-L-04-CG-MT, COMISSA, México

Sámano, A. **Experiencias de construcción y comportamiento de lumbreras de anillos en la Ciudad de México**. En: III Congreso Mexicano de Ingeniería de Túneles y Obras Subterráneas (1999, México D.F.). Memoria Técnica. AMITOS, México D.F., 1999.

Santoyo, E. **Vigésima conferencia Nabor Carrillo: Exploración de suelos. Métodos directos e indirectos; muestreo y pruebas de campo**. En: XXV Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica (2010, Acapulco, Guerrero. México.). SMIG, México D.F., 2010.

Tamez, E. et ál. 1997. **Diseño geotécnico de túneles**, TGC Geotecnia, 1a edición, Distrito Federal, México.

Trigo, M. 2009. **Bases de diseño para lumbreras** TEO-1-L-04-BD-CL, COMISSA, México.

Velásquez, N. 2010. **Corte transversal A-A Lumbraera 04**, Plano con clave TEO-1-L-04-ES-04, COMISSA, México.

Zemva, S. **Memoria descriptiva del procedimiento constructivo de la unidad de pretratamiento y del cárcamo de agua pluvial del proyecto ejecutivo de la estación de bombeo No. 1-38 para el sistema de alcantarillado sanitario, zona este, Matamoros, Tamaulipas**. En: X Congreso Panamericano de mecánica de suelos e ingeniería de cimentaciones (1995, Guadalajara, Jalisco). Memoria Técnica, Vol. II. , Guadalajara, Jalisco 1995.