



**UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE MÉXICO**



FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES DE INGENIERÍA

CAMPO DE CONOCIMIENTO: INGENIERÍA CIVIL

**ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE UNA LUMBRERA FLOTADA, EN  
ARCILLA BLANDA**

**T E S I N A**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

**ESPECIALISTA EN GEOTECNIA**

PRESENTA:

**ING. MARÍA FERNANDA ANGULO ESCOTTO**

DIRECTOR DE TESINA: M. EN I. OLIVER ELIMELEC NAVA TRISTÁN

MÉXICO, D.F.

JUNIO 2021

## **DEDICATORIAS**

A mis padres: Ericka Escotto Castillo y Alejandro Angulo Paz, por todo su amor, consejos, sacrificios, motivación, paciencia y apoyo incondicional.

A toda mi familia y novio que amo y llevo en mi corazón.

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Programa Único de Especializaciones en Ingeniería (PUEI) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), específicamente a la Coordinación en Geotecnia por el apoyo brindado durante la especialidad.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo otorgado durante el programa de especialidad.

Al M. en I. Oliver Elimelec Nava Tristán por todo su apoyo en el presente trabajo.

## ÍNDICE

<b>RESUMEN</b>	<b>1</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>1</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>2</b>
1.1 Objetivo	3
<b>2. PROCESOS CONSTRUCTIVOS PARA LUMBRERAS EN SUELOS</b>	<b>4</b>
2.1 Métodos convencionales	4
2.1.1 Pozo indio	5
2.2 Métodos de retención previos a la excavación	6
2.2.1 Lumbrera con muros Millán	6
2.2.2 Lumbrera con tablestaca	8
2.2.3 Lumbrera con muros de pilas secantes	9
2.3 Métodos mixtos	10
2.4 Método de los anillos	11
2.5 Lumbrera flotada	14
2.6 Técnicas constructivas para lumbreras en suelos utilizadas en México.	20
<b>3. CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DEL SITIO</b>	<b>24</b>
3.1 Ubicación	24
3.2 Geología de la zona de estudio	25
3.3 Estratigrafía	26
3.4 Exploración geotécnica	27
3.4.1 Sondeo mixto	27
3.4.2 Prueba de veleta	28
3.4.3 CPTu (Sondeo con cono eléctrico)	29
3.4.4 Prueba de compresión triaxial UU	30
3.5 Descripción de los datos obtenidos de la exploración geotécnica	34
3.6 Modelo geotécnico	34
<b>4. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE LA LUMBRERA FLOTADA</b>	<b>40</b>
4.1 Estabilidad de zanja	40
4.1.1 Análisis con el criterio Noruego	40
4.2 Estabilidad del núcleo	42
4.3 Estabilidad del fondo por cortante	43
4.4 Estabilidad del fondo por sub-presión	45
4.5 Estabilidad por flotación	46
4.6 Estabilidad por extrusión	47
<b>5. RESULTADOS</b>	<b>49</b>
5.1 Estabilidad de las paredes con el criterio Noruego	49
5.2 Estabilidad del núcleo	50
5.3 Estabilidad del fondo por cortante	50
5.4 Estabilidad del fondo por sub-presión	52
5.5 Estabilidad por flotación	53
5.6 Estabilidad por extrusión	53

<b>6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>54</b>
<b>7. BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>56</b>

## **“Análisis de estabilidad de una lumbrera flotada, en arcilla blanda”.**

### **RESUMEN**

Existen varios procesos para construir una lumbrera en arcilla blanda como la de la Ciudad de México, siendo la técnica de “lumbrera flotada” una opción como proceso constructivo, este proceso se caracteriza por la inmersión de la estructura en presencia de lodo bentonítico, pues este fluido es el que le da estabilidad a la excavación previa. Este proceso constructivo debe ser evaluado para las condiciones más críticas y para ello se realizan análisis de estabilidad que garanticen la seguridad de la estructura. Los análisis que se realizan son: la estabilidad de las paredes de la excavación, estabilidad del núcleo, estabilidad del fondo por cortante, estabilidad del fondo por sub-presión, estabilidad por flotación y estabilidad por extrusión; en la mayoría de estos análisis la incógnita es la altura mínima que puede tener el lodo bentonítico durante el proceso constructivo para mantener estable la excavación durante todo el proceso, además de la presión del agua en la capa permeable que está por debajo de la estructura y el peso de la propia estructura para mitigar el efecto de flotación.

### **ABSTRACT**

There are several processes to build a port in soft clay like the one in Mexico City, being the technique of floating port an option as a construction process, this process is characterized by the immersion of the structure in the presence of bentonite mud, as this fluid is what gives stability to the previous excavation. This construction process must be evaluated for the most critical conditions and for this a stability analysis is carried out that guarantees the safety of the structure. The analyzes carried out are: stability of the excavation walls, stability of the core, stability of the bottom by shear, stability of the bottom by sub-pressure, stability by flotation and stability by extrusion; In most of these analyzes, the unknown is the maximum height that the bentonite mud can have during the construction process to keep the excavations stable throughout the process, in addition to the water pressure in the permeable layer that is below the structure and the weight of the structure itself to mitigate the floating effect.

## 1. INTRODUCCIÓN

Una lumbrera es una estructura que sirve de apoyo en la construcción de túneles, principalmente como ayuda en el montaje y desmontaje de las tuneleadoras, en el suministro de materiales y equipos, para el retiro del material producto de la excavación durante el proceso constructivo de estos túneles, y en la inspección, mantenimiento y operación del túnel (Aguilar, et al., 2019).

La construcción de túneles y lumbreras en los suelos arcillosos blandos del Valle de México ha significado un gran reto para la ingeniería civil en el aspecto geotécnico y constructivo, debido a las desfavorables propiedades geotécnicas que presenta el subsuelo del valle (Aguilar, et al., 2019).

Los suelos blandos propios de la zona de lago del Valle de México como lo son las arcillas de baja resistencia al corte que en presencia de aguas freáticas y al ser excavados para la construcción de una lumbrera, presentan dificultades de estabilidad que se agravan a medida que las características del suelo se modifican con el tiempo (Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica/Secretaría General de Obras/DDF, 1991).

La Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica/Secretaría General de Obras/DDF en su artículo “Análisis y procedimientos constructivos de lumbreras del Sistema de Drenaje Profundo de la Ciudad de México” en 1991, menciona que la empresa mexicana Constructora Estrella fundada en 1948 especialista en la construcción de túneles y con una vasta experiencia en la estabilización de pozos profundos y zanjas para muros Milán mediante lodos bentoníticos, ideó un método llamado “lumbrera flotada”, que garantiza la estabilidad del fondo y paredes de la excavación, posibilitando la construcción de la losa de fondo y muro de la lumbrera (Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica/Secretaría General de Obras/DDF, 1991).

El proceso de construcción de una lumbrera mediante el método de “lumbrera flotada”, es uno de los procedimientos más frecuentemente utilizados en los suelos blandos del Valle de México (Aguilar, et al., 2019)., durante la etapa de excavación del núcleo de suelo en este proceso constructivo, generalmente se verifica la estabilidad de ésta ante un estado límite de falla, confirmando que los factores de seguridad cumplan con los mínimos admisibles (Acevedo y Aguilar, 2019).

Algunos de los principales riesgos y problemáticas que se pueden presentar en la construcción de lumbreras bajo el método de lumbrera flotada son: escasez en los alcances de los estudios geológicos, geotécnicos y geohidrológicos realizados en la zona de estudio; el uso equivocado de criterios de diseño aplicables a infraestructura de la superficie; un inadecuado diseño estructural del tanque de flotación; desfavorables sobreconsumos del lodo fraguante utilizado en la formación de la pantalla perimetral, que se traducen en intrusiones de lodo que invaden el espacio donde posteriormente se excava el núcleo de la lumbrera; suministro inoportuno del tanque de flotación; inadecuados análisis de los procesos de inmersión y flotación durante la construcción de la lumbrera; falta de personal capacitado y con experiencia en el procedimiento constructivo; falta de control topográfico sistemático en el proceso constructivo de la lumbrera; y falta de control de calidad (Aguilar, et al., 2019).

## **1.1 Objetivo**

Analizar la estabilidad de una Lumbrera Flotada en condiciones estáticas, ubicada en la zona de Lago, mediante cálculos analíticos para distintas condiciones de estabilidad, con la previa caracterización del sitio a partir de resultados de pruebas de campo y laboratorio.

## 2. PROCESOS CONSTRUCTIVOS PARA LUMBRERAS EN SUELOS

En este capítulo se describen los procesos constructivos más utilizados para lumbreras en suelos, sin embargo, la técnica utilizada para el presente trabajo es la de lumbrera flotada.

En el Manual de Diseño de Obras Civiles en su capítulo B.5.1 Túneles y lumbreras, publicado en el año 2018 por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y el Instituto de Ingeniería de la UNAM, se realizó la siguiente clasificación de los procesos constructivos para lumbreras en suelos.

### 2.1 Métodos convencionales

Utilizados comúnmente para la construcción de lumbreras en materiales no saturados o secos con alta cohesión, en los que después de realizar un análisis de estabilidad, se demuestra que no existen problemas de falla de las paredes o del fondo durante la excavación (CFE e Instituto de Ingeniería UNAM, 2018).

Estos métodos consisten en la excavación de un pozo a cielo abierto ya sea por medios mecánicos o manuales. Para detectar la presencia de algún lente o estrato de material inestable en las paredes durante la excavación, ésta se realiza por etapas como se muestra en la imagen 2.1, iniciando por el centro dejando una berma perimetral, enseguida se retira la berma en sectores alternados y se coloca el revestimiento primario que puede estar formado por concreto lanzado reforzado con malla y sostenido con anclas cortas (CFE e Instituto de Ingeniería UNAM, 2018). Dicho revestimiento tiene la finalidad de sostener fragmentos de material que pudieran caer al interior de la lumbrera durante la excavación y evitar la pérdida de humedad del material excavado, una vez alcanzada la profundidad del proyecto, se construye la losa de fondo y, de ser necesario, el revestimiento definitivo (CFE e Instituto de Ingeniería UNAM, 2018).

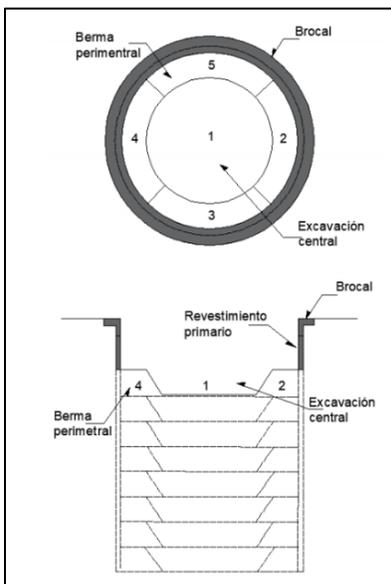


Imagen 2.1. Excavación por métodos convencionales.

### 2.1.1 Pozo Indio

Este proceso es utilizado frecuentemente en materiales sin presencia del nivel de agua freático en los que, después de realizar un análisis, se demuestra que pueden presentarse problemas de estabilidad de las paredes debido a la pérdida de confinamiento del material pero que no existen problemas de falla del fondo durante la excavación (CFE e Instituto de Ingeniería UNAM, 2018).

El proceso consiste en construir de forma alternada la estructura de la lumbrera, primero excavando el suelo del centro por medio de una almeja para producir el descenso de la estructura (imagen 2.2), luego construyendo el siguiente tramo superior de la estructura y volver a excavar para continuar el descenso, logrando que esta penetre hasta la profundidad requerida (Murillo, 2017). El cuerpo de la lumbrera puede construirse en el sitio en el caso de los muros de concreto armado, o armarse mediante anillos prefabricados como se muestra en la imagen 2.3 (CFE e Instituto de Ingeniería UNAM, 2018). En la punta de la estructura se coloca un borde cortante o filo que ayuda en la penetración de la lumbrera durante la excavación (imagen 2.2), al final, una vez alcanzada la profundidad del proyecto se vierte concreto en su interior para formar la losa de fondo o tapón como se observa en la imagen 2.4 (CFE e Instituto de Ingeniería UNAM, 2018).

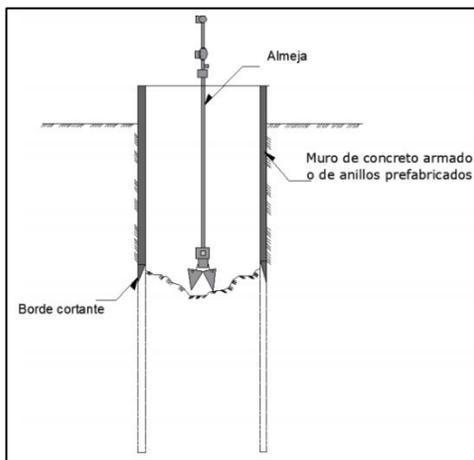


Imagen 2.2. Excavación y descenso de la estructura.



Imagen 2.3. Armado de anillos prefabricados.

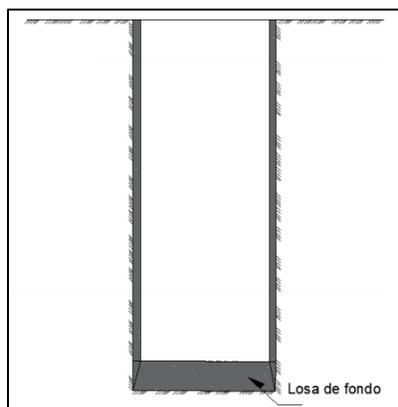


Imagen 2.4. Armado y colado de la losa de fondo.

## **2.2 Métodos de retención previos a la excavación.**

Dichos métodos pueden emplearse para la construcción de lumbreras en prácticamente cualquier tipo de suelo, permiten evitar la falla de las paredes por pérdida de confinamiento del material y disminuir la probabilidad de falla de fondo (CFE e Instituto de Ingeniería UNAM, 2018). Su construcción puede efectuarse tanto en seco como en presencia del nivel de aguas freáticas, siempre y cuando se demuestre que existe estabilidad del fondo por cortante y por sub-presión (CFE e Instituto de Ingeniería UNAM, 2018).

Se considerarán como métodos de retención previos a la excavación de la lumbrera, a: muros colados en el lugar (muros Milán), tablestacas y muros de pilas secantes (CFE e Instituto de Ingeniería UNAM, 2018).

### **2.2.1 Lumbrera con muros Milán**

El proceso constructivo de una lumbrera con muro Milán incluye llevar a cabo los siguientes pasos:

- Acondicionamiento de la plataforma de trabajo e instalación de la instrumentación geotécnica indicada en el proyecto ejecutivo correspondiente (Aguilar et al, 2019).
- Se procede al trazo y nivelación de la lumbrera mediante el uso de equipo topográfico (Saucedo, 2018).
- Construcción de los brocales temporales (interior y exterior), los cuales sirven para dar estabilidad al borde de la excavación y para que la máquina excavadora pueda aproximarse a esta de manera segura y alineada (CFE e Instituto de Ingeniería UNAM, 2018).
- Se realiza la excavación de la sección donde será colocado el tablero de muro Millán, para la cual se utiliza un equipo guiado con almeja (Saucedo, 2018). El orden de la excavación de las secciones es alternado para evitar algún riesgo de inestabilidad al tener dos excavaciones cercanas (Saucedo, 2018). La excavación se realiza sustituyendo en todo momento el material excavado por lodo bentonítico para darle estabilidad a las paredes de la excavación (Gutiérrez, 2018).
- Al finalizar la excavación de la sección del tablero, se realiza la colocación de una junta constructiva (extraíble) que sirve para delimitar la sección excavada de la sección adyacente a excavar (Saucedo, 2018), dar soporte a la presión del concreto durante el colado y evitar la fuga lateral del mismo hacia secciones aún no coladas (Guerrero, 2017), además de proteger el muro ya colado de posibles impactos con la máquina excavadora (almeja) y también para generar un machihembrado que permita una mejor unión estructural de los tableros (Guerrero, 2017). La junta es del tipo CWS metálica con sección triangular (Saucedo, 2018), o trapezoidal (Guerrero, 2017), con banda de estanqueidad de PVC para evitar fugas de concreto entre secciones (Aguilar et al, 2019).

- Una vez colocada la junta se procede al izaje del armado de refuerzo de muro Millán, la cual se introduce a la sección excavada llena de lodo bentonítico y se asegura a la zona de brocales para evitar que el armado toque el fondo de la excavación; una vez colocado se procede a realizar el colado de concreto para el cual se utiliza una tubería Tremie, dicha tubería se introduce hasta la profundidad máxima de excavación dejando un espacio suficiente para que pueda salir el concreto, conforme se va llenando la excavación de concreto el lodo bentonítico va siendo desplazado y bombeado para su recuperación en un tanque; la tubería Tremie se va subiendo por la excavación conforme esta se va llenando de concreto hasta llegar a la superficie del terreno desplazando por completo el lodo bentonítico (Saucedo, 2018). Una vez fraguado el concreto se retira la junta metálica quedándose ahogada la banda de PVC (Saucedo, 2018).
- Terminados los colados de los muros se procede a la demolición de los brocales temporales, y de la parte superficial de los muros (descabece) hasta el nivel del proyecto con la finalidad de retirar el concreto contaminado con lodo bentonítico (Saucedo, 2018). Una vez terminada la demolición de los brocales y el descabece se coloca una trabe de coronamiento, para ligar estructuralmente la parte superior de los tableros del muro Millán (Aguilar et al, 2019).
- Posteriormente se procede a la excavación del núcleo “en seco” (imagen 2.5), esta es una diferencia importante con respecto al procedimiento de lumbrera flotada, ya que la excavación del núcleo se realiza “en seco”, es decir, sin lodo bentonítico (Aguilar et al, 2019). Otra diferencia estriba en el manejo y disposición final de la rezaga, ya que en las lumbreras flotadas por lo general se necesitan pipas, y se requiere que aquella sea tratada por estar contaminada con lodo bentonítico, condición que puede tener un impacto negativo en el medio ambiente (Aguilar et al, 2019).



Imagen 2.5. Excavación en seco del núcleo.

- Una vez concluida la excavación del núcleo se realiza apisonado para dar nivel al fondo de la lumbrera, luego se procede a la colocación de la losa de fondo, iniciando con el armado del acero de refuerzo y después el colado del concreto (Saucedo, 2018). Posterior al fraguado se realiza el curado dejando un espejo de agua para evitar la deshidratación de la losa (Saucedo, 2018).
- Finalmente se coloca el revestimiento definitivo de la lumbrera, que funciona principalmente para contrarrestar acciones sísmicas (Aguilar et al, 2019). Para ello se dejan tramos de varilla en la losa de fondo para anclar el revestimiento e iniciar el armado y terminarlo en superficie, a su vez se construye un andamio circular para el desplazamiento del personal y armado del acero (Saucedo, 2018). Para el colado del revestimiento definitivo se utiliza una cimbra deslizante la cual se habilita y arma en superficie para verificar diámetros y el funcionamiento de la misma; una vez que la cimbra deslizante es introducida al fondo de la lumbrera se inicia el colado de concreto hasta que se llene la cimbra en su totalidad, y una vez que el concreto pueda auto soportarse puede iniciar el deslizado de la cimbra, una vez deslizada el personal sobre un andador en la parte inferior de esta realiza el acabado final, concluyendo todo este proceso hasta llegar a la superficie (Saucedo, 2018).
- El espesor de los muros depende del espesor de la excavadora (almeja), que puede ser de 40, 60 y 80 centímetros (ALFO, CDMX). El espesor de la zanja se determina con base a la abertura de la almeja del equipo a utilizar (Jiménez, 2003).

### **2.2.2 Lumbrera con tablestaca**

Las tablestacas o tablaestacas son tablonces que se hincan en el suelo antes del proceso de excavación, estas pueden ser de diferentes materiales como, madera, concreto y acero (Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, A.C, 2002).

La tablestaca de madera tiene la ventaja de formar una barrera impermeable, debido a que la madera se hincha al contacto con el agua del suelo, impidiendo así filtraciones dentro de la excavación (Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, A.C, 2002); este tipo de tablestaca es muy flexible, por lo que generalmente se requieren más niveles de apuntalamiento, además, este método debe utilizarse solamente en suelos blandos, sin dificultades de hincado (Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, A.C, 2002). Para el hincado de la tablestaca, se sugiere utilizar martillos de caída libre o con una energía baja, para no romper las tablestacas (Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, A.C, 2002).

En el caso de las tablestacas de concreto reforzado se fabrican utilizando camas de colado o cimbras metálicas, luego se almacenan las piezas para su posterior hincado (Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, A.C, 2002). Las puntas generalmente se construyen biseladas entre 30° y 45°, para que durante el hincado se provoque la tendencia a acercarse a la tablestaca previamente colocada (Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, A.C, 2002).

El procedimiento constructivo para colocar tablestacas de concreto de acuerdo con el manual de construcción geotécnica publicado en 2002 de la Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, A.C. es:

- Se realiza la excavación de una zanja superficial para alojar la estructura de los brocales que servirán como guía en el hincado de las tablestacas de los primeros metros, ayudando a obtener una mayor verticalidad y posicionamiento del tablestacado.
- Después se hace el hincado de las piezas con martillos de caída libre, de diésel de acción sencilla u otros, siempre protegiendo la cabeza de la tablestaca; también es conveniente utilizar guías fijas para el hincado de las tablestacas para lograr mayor alineamiento en la pieza.
- En ocasiones es necesario realizar perforaciones previas para ayudar al hincado de la tablestaca, cuando existan estratos que dificulten el proceso, dichas perforaciones se hacen en la zona donde se ubicará la unión entre tablestacas.

Las tablestacas de acero son las que mundialmente se utilizan más debido a su resistencia, peso ligero y durabilidad, consisten fundamentalmente de paneles interconectados por perfiles estructurales laminados (Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, A.C, 2002). Existen tres tipos de perfiles de tablestaca de acero: en “Z”, en “U” y plano; y el proceso de hincado puede ser por impacto o por medio de martillos vibratorios, el tipo de hincado dependerá del tipo de suelo y del perfil seleccionado, considerando que a mayor superficie expuesta de la tablestaca mayor será la fuerza de hincado requerida (Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, A.C, 2002). Para lograr un correcto alineamiento vertical y horizontal del tablestacado es necesario utilizar guías o escantillones de hincado, las guías se fabrican con perfiles estructurales cuyas dimensiones dependerán de las longitudes de hincado y profundidad de diseño (Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, A.C, 2002).

El procedimiento de construcción de una lumbrera con tablestaca se puede describir de la siguiente manera (ZINZANJA, S.A. de C.V. Ingeniería subterránea avanzada, 2013):

- Trazo y nivelación en superficie.
- Excavación para guía de hincado de ademe.
- Hincado de tablestaca.
- Excavación de núcleo.
- Colocación de troquelamiento.
- Estabilización del fondo por medio de losa de concreto según el proyecto.

### **2.2.3 Lumbrera con muros de pilas secantes**

El procedimiento en general se refiere al uso de pilas coladas en sitio para formar una barrera, se utilizan particularmente en áreas donde el ruido o las vibraciones al hincar tablestacas en las colindancias son indeseables, o en sitios con acceso o altura restringidos (Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, A.C, 2002).

En este procedimiento se construyen pilas “primarias” separadas entre 0.8 y 0.9 veces su diámetro, y son intersectadas por pilas “secundarias”, para formar una estructura cerrada como se muestra en la imagen 2.6, que actúa como una barrera, cuando las pilas

secundarias se encuentran adyacentes a las primarias, se les conoce como pilas tangentes (Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, A.C, 2002).

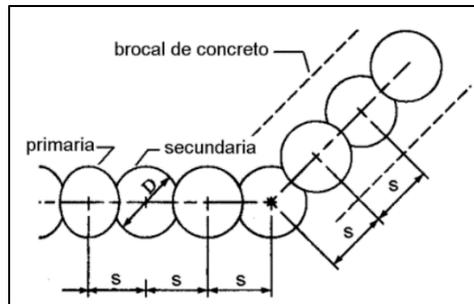


Imagen 2.6. Colocación de las pilas primarias y secundarias.

Una de las principales características del método es que se requiere un gran control en la verticalidad de las perforaciones, y el procedimiento de construcción se puede clasificar de acuerdo con la manera en que se construyen las pilas primarias (Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, A.C, 2002):

- Técnica duro/duro. Las pilas primarias y secundarias se construyen con concreto reforzado o mortero de alta resistencia, si se utilizó un equipo de hélice continua, ya que estos quipos tienen la capacidad de perforar diversas condiciones de suelo, como concreto reforzado sin necesidad de golpeteo con trépanos.
- Técnica suave/duro. Las pilas primarias se construyen con una mezcla de cemento-bentonita para poder perforar las pilas secundarias con mayor facilidad, utilizando equipos de menor par de torsión; esta técnica es de menor costo que la anterior, debido a la menor resistencia de las pilas primarias y a que solamente las pilas secundarias son de concreto reforzado, por lo que está limitada a excavaciones someras o donde se tengan momentos flexionantes relativamente bajos.

Para la perforación de las pilas se utiliza un brocal de concreto, que sirve como guía para ubicar las pilas primarias y secundarias (Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, A.C, 2002).

### 2.3 Métodos mixtos

Los métodos mixtos consisten en combinar los métodos de retención previos a la excavación (muro Milán, tablestacas o pilas secantes) con los métodos convencionales, como se muestra en la imagen 2.7 (CFE e Instituto de Ingeniería UNAM, 2018). Estos métodos se emplean cuando se determina que la excavación de la lumbrera es inestable hasta cierta profundidad y que, de ahí en adelante, las paredes y el fondo son estables siempre y cuando se aplique algún método de retención en la zona superficial inestable (CFE e Instituto de Ingeniería UNAM, 2018).

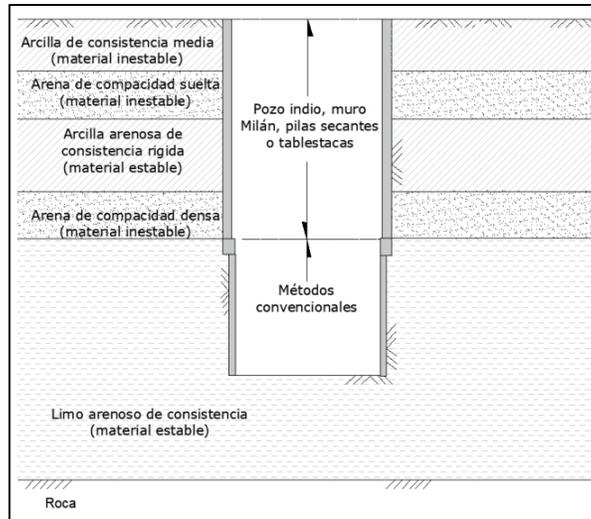


Imagen 2.7. Ejemplo de aplicación de métodos mixtos.

## 2.4 Método de los anillos

Este método se ha utilizado con éxito en la construcción de lumbreras en las arcillas lacustres de la ciudad de México, el procedimiento reduce de manera importante la posibilidad de falla de las paredes por extrusión y la probabilidad de falla de fondo por cortante y por sub-presión (CFE e Instituto de Ingeniería UNAM, 2018). La idea de este procedimiento constructivo deriva de la metodología de construcción de túneles en suelos blandos (Zemva, 2011). Las etapas del procedimiento constructivo son las siguientes (CFE e Instituto de Ingeniería UNAM, 2018):

- Se realiza el trazo, excavación, armado y colado de brocales interior y exterior como se muestra en la imagen 2.8, los brocales sirven como guía para el equipo con almeja que se utiliza para la excavación del muro de la lumbrera.

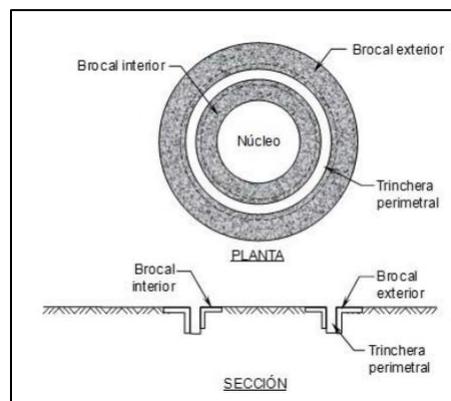


Imagen 2.8. Vista en planta y sección del trazo de la trinchera perimetral y brocales interior y exterior.

- Después se procede a la excavación de la zanja perimetral con almeja guiada, sustituyendo en todo momento el material excavado por lodo bentonítico para estabilizar las paredes de la excavación (imagen 2.9).

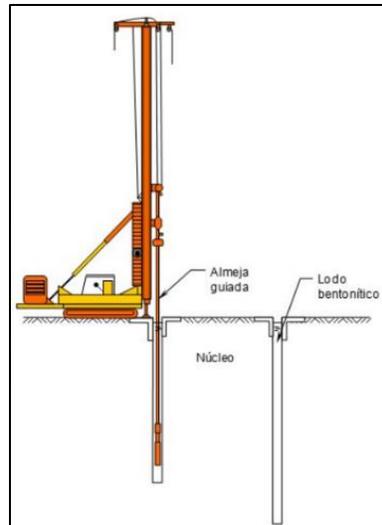


Imagen 2.9. Excavación de zanja perimetral con almeja guiada y sustitución con lodo.

- Se realiza la demolición del brocal interior y excavación del núcleo de la lumbrera con almeja, al igual que en la zanja perimetral el material excavado es sustituido por lodo bentonítico para estabilizar la excavación (imagen 2.10).

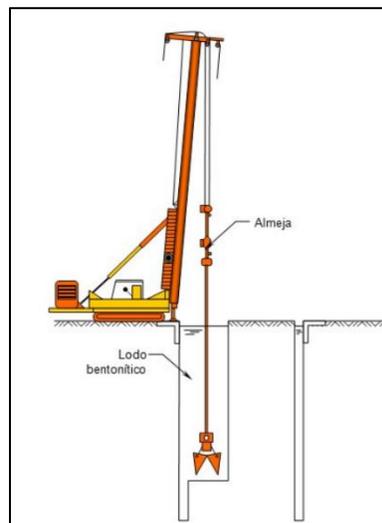


Imagen 2.10. Excavación del núcleo de la lumbrera con almeja.

- Se procede a la inmersión del primer anillo y de las vigas guía (imagen 2.11); en la imagen 2.12 se muestra como los anillos están formados por dovelas de concreto reforzado unidas entre sí por placas de acero, el primer anillo cuenta con una

estructura central formada por vigas radiales en forma de estrella (Zemva, 2011). La inmersión se realiza con ayuda de grúas, y debe considerarse una separación entre el primer anillo y el fondo de la excavación de aproximadamente 60 centímetros.

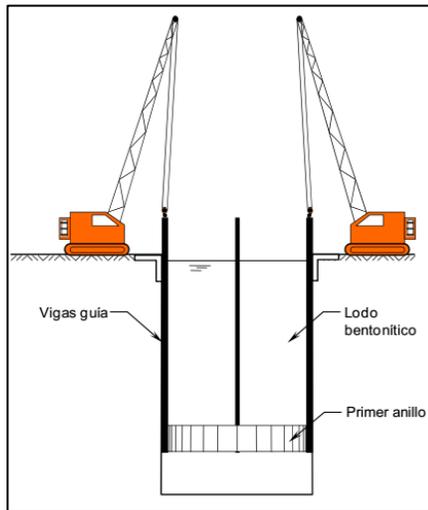


Imagen 2.11. Inmersión del primer anillo y las vigas guía.

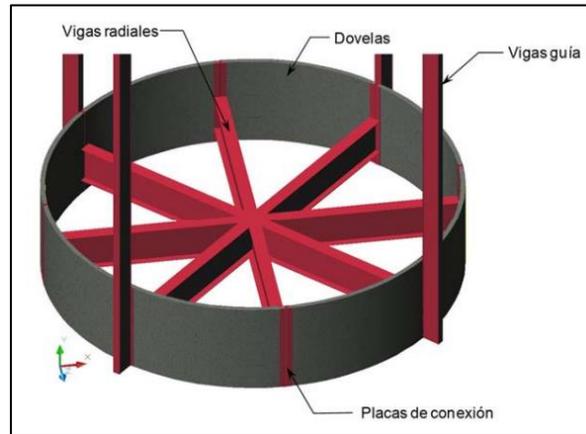


Imagen 2.12. Partes que conforman el primer anillo.

- Se realiza el soldado de las vigas guía al brocal exterior, seguido del colado de la losa de fondo con ayuda de tubería Tremie, desplazando cierto volumen de lodo bentonítico (imagen 2.13).

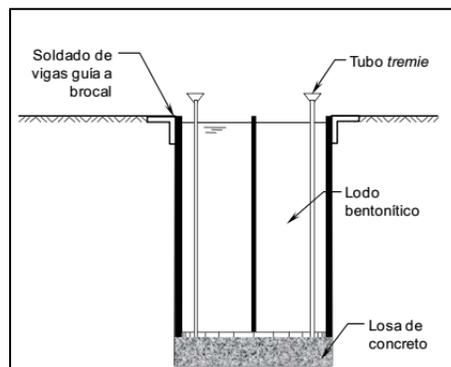


Imagen 2.13. Soldado de las vigas guía al brocal y colado de la losa de fondo.

- Se procede a la inmersión de los demás anillos con la ayuda de las vigas guía y de grúas para nivelar los anillos (imagen 2.14). Es importante considerar que el espacio entre los anillos y las paredes de la excavación este cubierto de lodo bentonítico en todo momento para evitar desestabilidad.

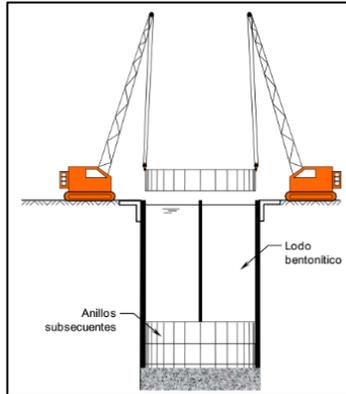


Imagen 2.14. Inmersión de los anillos subsecuentes.

- Finalmente se realiza el colado del espacio entre los anillos y la pared de la excavación con una mezcla de mortero-bentonita, esto se realiza introduciendo una tubería Tremie hasta el fondo de la zanja para la inyección de mortero la cual se va subiendo conforme progresa el llenado (imagen 2.15), desplazando el lodo contenido en la zanja, una vez alcanzado el nivel del proyecto se garantiza que las paredes de la excavación quedan confinadas por la mezcla de mortero-bentonita (Jiménez, 2003).

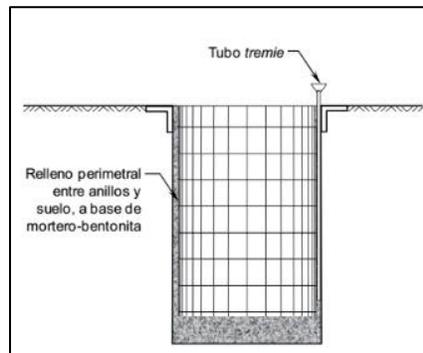


Imagen 2.15. Colado del espacio entre los anillos y la pared de la excavación.

## 2.5 Lumbrera flotada

La empresa mexicana Constructora Estrella fundada en 1948 desarrollo innovaciones para el diseño de procedimientos para la construcción de lumbreras (AMITOS, 2018), como lo fue el método llamado “lumbrera flotada” (Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica, Secretaría General de Obras DDF, 1991), patentado por los ingenieros de dicha constructora Jorge Cravioto y Abel Villarreal en 1969 (Zemva, 2011). Dicho método garantiza la estabilidad del fondo y paredes de la excavación, posibilitando la construcción de la losa de fondo y muro de la lumbrera; este método es uno de los más utilizados en la

zona de lago de la Ciudad de México (Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica, Secretaría General de Obras DDF, 1991; y Aguilar et al, 2019).

El proceso constructivo de lumbrera flotada incluye llevar a cabo el siguiente procedimiento:

- Acondicionamiento de la plataforma de trabajo e instalación de la instrumentación geotécnica indicada en el proyecto ejecutivo correspondiente (Aguilar et al, 2019).
- Se realiza el trazo de las dimensiones de los brocales interiores y exteriores en superficie, como se muestra en la imagen 2.16 (CFE e Instituto de Ingeniería UNAM, 2018).

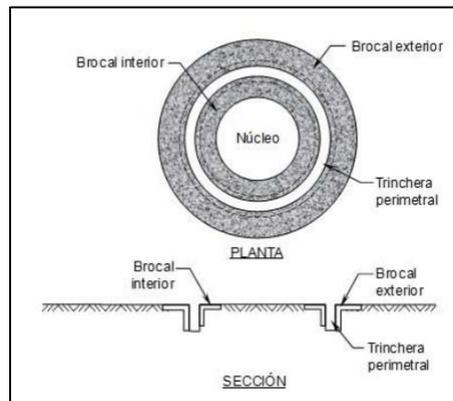


Imagen 2.16. Trazo de los brocales interiores y exteriores.

- Colocación de una pantalla perimetral o muro pantalla de mortero o de lodo fraguante, dependiendo de las características del sitio (Aguilar et al, 2019); su realización es similar al de muro Millán, se hace la excavación de la zanja con almeja, sustituyendo el material excavado por lodo bentonítico y posteriormente sustituido por el mortero o el material del muro pantalla.
- Se realiza la excavación para la construcción de los brocales interior (temporal) y exterior (permanente), previo al colado del brocal exterior se dejan ancladas una serie de varillas colocadas en la circunferencia del brocal que definirán la ubicación de las viguetas metálicas que servirán de apoyo para el sistema de flotación (Jiménez, 2003), es decir, estas viguetas o trabes servirán para ligar la estructura de la lumbrera con el brocal exterior (Aguilar et al, 2019). El ancho de la zanja o trinchera perimetral es el espacio entre ambos brocales (imagen 2.16) y se determina de acuerdo con la abertura de la almeja del equipo a utilizar; los brocales tienen la función de guiar el equipo excavador a través de la zanja anular (Jiménez, 2003).
- Una vez construidos ambos brocales se procede a excavar la zanja anular hasta la profundidad del proyecto, esto con un equipo de almeja guiada como el que se muestra en la imagen 2.17, sustituyendo en todo momento el material excavado por lodo bentonítico (imagen 2.18), la excavación se realiza en forma alternada entre

las secciones formadas por los brocales, con la finalidad de proteger la estabilidad de las paredes excavadas (Jiménez, 2003).

- En seguida se demuele el brocal interior y procede a la excavación del núcleo de suelo (imagen 2.19), esto se realiza con ayuda de un equipo mecánico como la almeja guiada. El suelo excavado se va sustituyendo por lodo bentonítico hasta alcanzar la profundidad requerida, resultando una “alberca” de lodo como se muestra en la imagen 2.20 cuya función será estabilizar las paredes de la excavación en proceso, además de contrarrestar una posible falla de fondo por cortante o por sub-presión (Aguilar et al, 2019).
- El tanque de flotación (tambor metálico sin tapa de fondo), es una parte esencial de este procedimiento pues permite realizar principalmente dos actividades: servir de cimbra y apoyo de la losa de fondo de la estructura de la lumbrera y también como sistema de flotación e inmersión secuencial de la estructura en construcción, permitiendo generar una burbuja de aire en su interior para controlar su descenso (Aguilar et al, 2019).



Imagen 2.17. Equipo de almeja guiada.

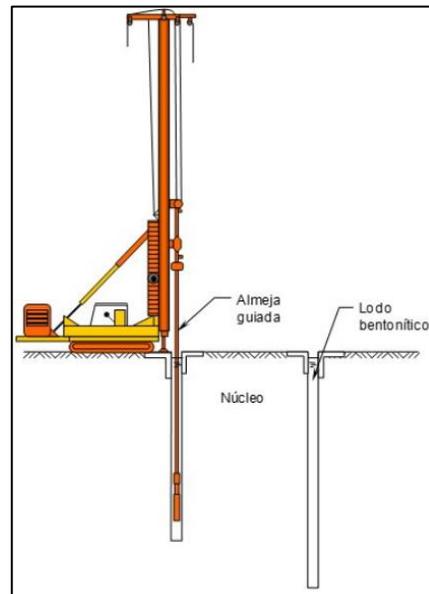


Imagen 2.18. Excavación de la zanja perimetral.

- Concluida la excavación del núcleo, se revisa la geometría de sus paredes para asegurar que no existan protuberancias hacia el interior de la excavación que impidan o dificulten el descenso del tanque y la estructura de la propia lumbrera (Aguilar et al, 2019). Confirmado lo anterior, se procede con la colocación del mencionado tanque en la boca de la excavación con ayuda de plumas con malacate para nivelarlo (imagen 2.21), y una vez colocado es soportado mediante viguetas metálicas al brocal externo como se muestra en la imagen 2.22 (Aguilar et al, 2019). Después se inicia el proceso de colado de la estructura cilíndrica de concreto de la

lumbreira iniciando por su losa de fondo (imagen 2.22) y siguiendo por su fuste, mediante etapas constructivas con ciclos de avance que incluyen: colocación del acero de refuerzo, cimbrado, colado del concreto, descimbrado, inmersión (Aguilar et al, 2019). También se debe considerar la colocación de cejas metálicas en la cara exterior del muro cuya posición deberá coincidir con las trabes de liga, pues son las que le darán apoyo a la estructura de la lumbreira una vez realizada la inmersión (Jiménez, 2003).

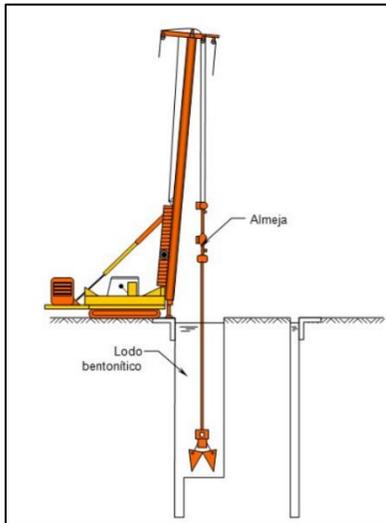


Imagen 2.19. Excavación del núcleo de suelo.



Imagen 2.20. "Alberca" de lodo bentonítico que sustituyó el suelo del núcleo.

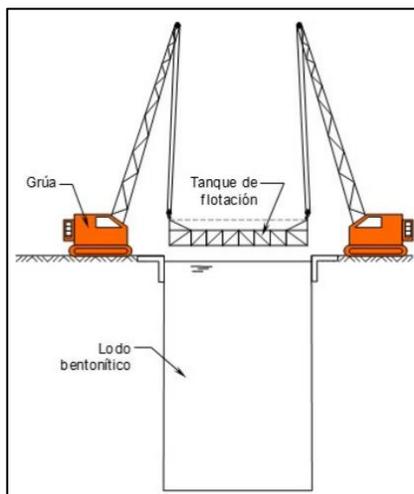


Imagen 2.21. Colocación del tanque de flotación.

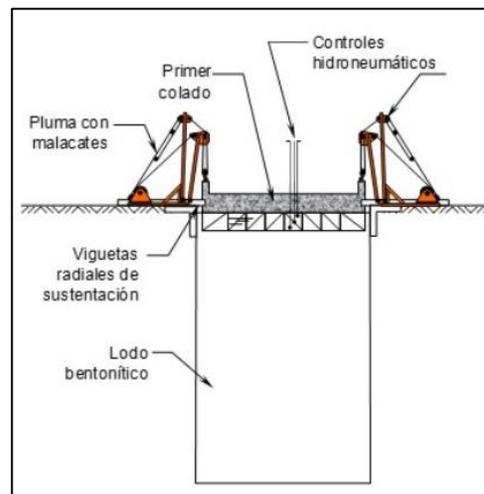


Imagen 2.22. Tanque soportado en el brocal externo; cimbrado, colado y armado de la losa de fondo.

Antes de iniciar el proceso de inmersión por etapas de la estructura de la lumbrera, se debe realizar un análisis detallado con base en el principio de Arquímedes, que tome en cuenta el peso total de la estructura en proceso de construcción y el peso del volumen de lodo desalojado por la porción sumergida, para así determinar el volumen de la cámara de aire en el interior del tanque de flotación que permita realizar la flotación y posterior inmersión de la estructura (Aguilar et al, 2019). Una vez determinado el volumen de la cámara, se inyecta el aire a presión a través de válvulas colocadas en las tuberías puestas previamente en el tanque, para poder desplazar el lodo que se encuentra dentro de la estructura metálica, permitiendo la flotación y de esta manera poder retirar las viguetas de sujeción; una vez realizado esto se abren las válvulas de expulsión de aire para desalojarlo paulatinamente e iniciar la maniobra de inmersión (Jiménez, 2003). El lodo de la zanja perimetral que va siendo desplazado es extraído mediante bombas y depositado en un tanque (Jiménez, 2003). El descenso es guiado a través de malacates hasta llegar al nivel requerido para iniciar la segunda etapa de cimbrado (imagen 2.23 y 2.24), nivel en el que la estructura es anclada al brocal con la primera etapa de avance (Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica/Secretaría General de Obras/DDF, 1991). El ciclo cimbra-inmersión se repite hasta que se alcancé la profundidad del proyecto.

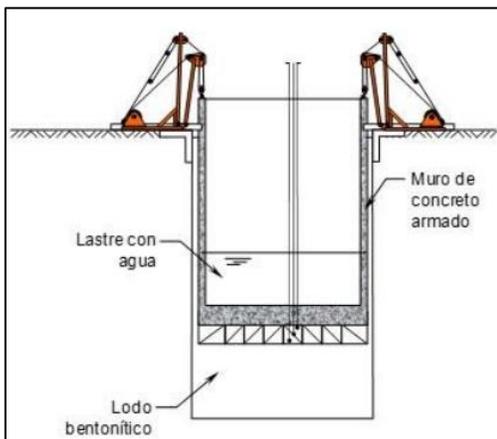


Imagen 2.23. Descenso guiado de la estructura.



Imagen 2.24. Repetición del ciclo de avance.

- En las etapas finales del proceso, es necesario lastrar con lodo o agua el interior de la estructura de la lumbrera (imagen 2.23), para evitar que flote (Aguilar et al, 2019).
- En la última etapa de inmersión debe considerarse una posible acumulación de azolve por debajo del tanque de flotación debido al desprendimiento de suelo de las paredes de la excavación, provocando la obstrucción del descenso vertical de la lumbrera (Jiménez, 2003). Para evitarlo se realiza la inyección de agua a presión por las tuberías colocadas previamente en la estructura del tanque de flotación, con el objetivo de desplazar el lodo y azolve por debajo de este (Jiménez, 2003). Una vez terminada la última etapa de cimbrado-inmersión se coloca la lumbrera a la

profundidad de proyecto y se sujeta provisionalmente mediante travesaños y las plumas de los malacates (Jiménez, 2003).

- Después de la inyección del agua a presión, se inyecta una mezcla de mortero a través de las tuberías localizadas en el centro y perímetro del tanque, iniciando con la inyección del centro y finalmente con las perimetrales, suspendiendo cuando el nivel de la mezcla sobrepase ligeramente el nivel inferior de la pared del tanque metálico, una vez fraguado el mortero se forma un tapón o sello alrededor del tanque flotante (Jiménez, 2003). Después se procede al armado, cimbrado y colado de las travesaños de anclaje al brocal, de tal manera que quede rigidizado el conjunto brocal-lumbrera (Jiménez, 2003). El siguiente paso es la inyección de mortero en la zanja perimetral, realizando primero el desazolve de la misma, luego se introduce una tubería hasta el fondo de la zanja para la inyección de mortero la cual se va subiendo conforme progresa el llenado, desplazando el lodo contenido en la zanja probando el efecto de la tubería Tremie, una vez alcanzado el nivel del proyecto se garantiza que las paredes de la excavación quedan confinadas por el mortero y estabilizada la lumbrera (Jiménez, 2003).
- Finalmente es retirado el lastre de lodo bentonítico del interior de la lumbrera y se realiza la limpieza (Aguilar et al, 2019).

## **2.6 Técnicas constructivas para lumbreras en suelos utilizadas en México**

La Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica, Secretaría General de Obras DDF en el artículo titulado “Análisis y procedimientos constructivos de lumbreras del Sistema de Drenaje Profundo de la Ciudad de México”, publicado en 1991 clasifica a las lumbreras construidas en suelos en dos clases: las construidas en suelos blandos y las construidas en suelos de consistencia blanda a firme, que típicamente son los que se encuentran en la zona de transición.

Los suelos de zona de transición están formados por una sucesión de estratos arenolimosos, arcillo-limosos, arenas y gravas localizados entre la zona de lomeríos (suelos compactados) y la zona de lago, ésta última compuesta de suelos blandos (arcilla de consistencia blanda y muy compresible); la zona de transición se divide en dos (Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica, Secretaría General de Obras DDF, 1991):

1. Zona de transición alta. Los suelos de dicha zona por lo general son de consistencia firme, donde la falla de fondo no preocupa y las expansiones son mínimas. Para este tipo de casos se ha empleado la técnica llamada lumbrera adomada o técnica "túnel".

### **2.6.1 Técnica de túnel**

Esta técnica consiste en excavar toda el área de la lumbrera hasta los dos metros de profundidad, y posteriormente se construye el brocal; después se realiza la excavación con un martillo neumático, de tal manera que deje un espacio suficiente para colocar un anillo de dovelas de concreto, el cual se ancla al suelo circundante. El núcleo central de suelo es

retirado para nuevamente excavar en la periferia y colocar el siguiente anillo de dovelas. Una vez terminada la instalación del tercer anillo de dovelas, se coloca un tapón en el fondo y se inyecta una lechada de cemento; este proceso de colocación de anillos e inyección de lechada se repite hasta alcanzar la profundidad del proyecto. Posteriormente se procede al colado de la losa de fondo y del muro de la lumbrera mediante cimbra deslizante (Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica, Secretaría General de Obras DDF, 1991).

2. Zona de transición baja. Los suelos localizados en esta zona, compuestos de estratos de arcilla blandos de espesores considerables, en este tipo de suelos es utilizado el procedimiento de muros colados en sitio, conocidos como técnica "Solum" o su variante, la llamada técnica "Solentache".

### 2.6.2 Técnica Solum

Esta técnica se describe con los siguientes pasos (Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica, Secretaría General de Obras DDF, 1991):

- Se marca en el terreno el núcleo de la lumbrera y las fronteras del revestimiento, y se subdivide el área en seis partes iguales, cada una con un ángulo central de  $60^\circ$  (imagen 2.25).
- Se realiza la excavación de la zanja anular que alojará el revestimiento de la lumbrera. Esta excavación se efectúa mediante perforaciones de 60 cm de diámetro en cada uno de los seis sectores en que se divide el perímetro anular, y con la profundidad requerida (imagen 2.25). Entre una perforación y otra permanecen franjas de suelo de aproximadamente 50 cm, que posteriormente son retiradas mediante almeja guiada, siempre reemplazando el material extraído por cantidades iguales de lodo bentonítico, que es el que le dará la estabilidad a la zanja.

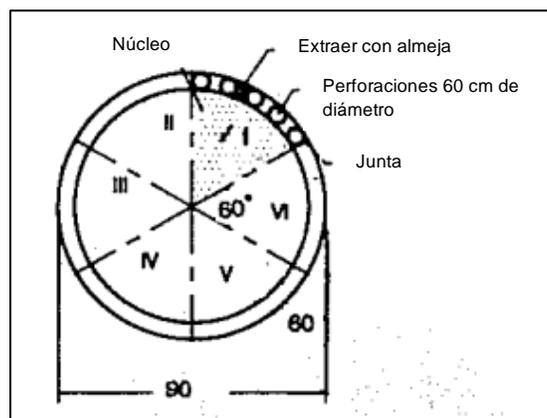


Imagen 2.25. Trazo del núcleo y de las fronteras de revestimiento, y realización de la excavación de la zanja anular.

- Después de excavar este primer sector anular se procede al colado del mismo, que consiste en bajar el armado, colando concreto desde el fondo a través de un tubo Tremie, desplazando el lodo bentonítico por diferencia de densidades. Se realiza este mismo procedimiento de excavación y colado para el siguiente sector anular en forma alternada, y así sucesivamente hasta terminar con la excavación y el revestimiento de las paredes de la lumbrera.
- Después se excava el núcleo con una almeja hasta la profundidad en la que no se presentan todavía expansiones en el fondo por la descarga del suelo. Al llegar a dicho nivel se suspenden los trabajos y se reemplaza el peso del material excavado por un volumen equivalente de agua para evitar expansiones y una eventual falla de fondo, la excavación del núcleo se continúa, extrayendo el material debajo del agua hasta llegar a la profundidad de diseño (imagen 2.26).

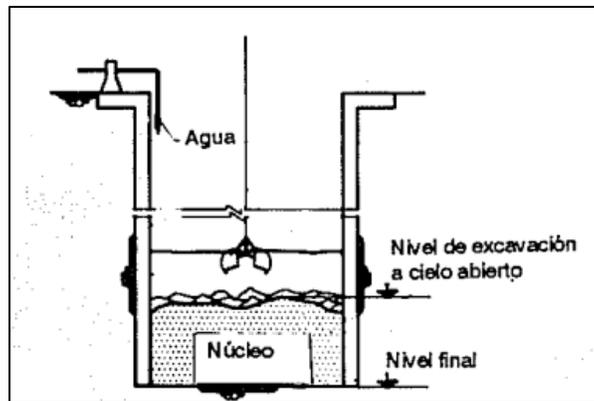


Imagen 2.26. Excavación del núcleo debajo del agua.

- Inmediatamente después de terminar la excavación se procede al colado de una primera losa de fondo de concreto en forma de tapón o plantilla, dejándose fraguar lo suficiente, sin extraer el agua (imagen 2.27).
- Después se limpia el azolve y se baja una parrilla de armado para colar una segunda losa de fondo bajo el agua (imagen 2.27). Una vez hecho esto, se extrae el agua dentro de la lumbrera bajando al personal necesario para sellar el tapón de fondo y evitar la entrada de agua o de material.
- Por último, se procede a la realización de la losa definitiva de concreto armado, anclada perfectamente a los muros de revestimiento de la lumbrera (imagen 2.27).

Una variante de la técnica "Solum" es la llamada técnica "Soletanche", cuya diferencia estriba en el método de perforación del anillo perimetral en el que se alojará el muro, y en la solución de la junta de colado de cada sector.

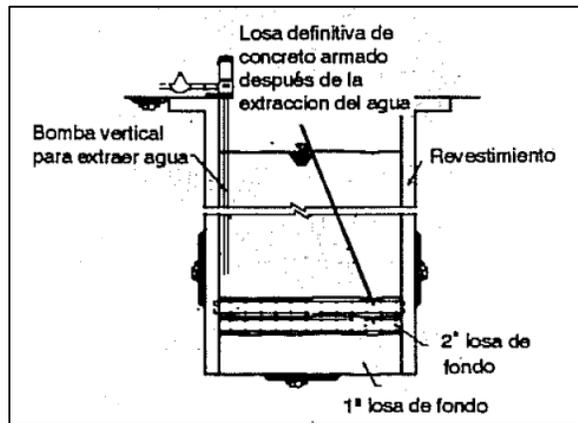


Imagen 2.27. Vista de colocación de la losa de fondo primaria, secundaria y definitiva.

### 2.6.3 Técnica Soletanch

Esta técnica se describe con los siguientes pasos (Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica, Secretaría General de Obras DDF, 1991):

- Se marca en el terreno el centro de la lumbrera y las fronteras del revestimiento, y se subdivide el área en seis partes iguales, cada una con un ángulo central de 60°.
- Se realiza la excavación de la zanja anular que alojará el revestimiento de la lumbrera, con un taladro barrenador guiado, colocado en la periferia de la lumbrera y montado sobre una vía. Esta maquinaria extrae el material por medio de una broca rotatoria y de percusión.
- Al comenzar la excavación del material se inyecta al mismo tiempo lodo bentonítico desde el exterior. La broca tiene las funciones de licuar el material y de extraer esta mezcla de rezaga y el lodo bentonítico por medio de una tubería de succión puesta dentro de la misma, depositando dicho material en un tanque sedimentador o de decantación ubicado en la superficie, donde se recupera la mayor parte del lodo para inyectarlo nuevamente (imagen 2.28). La maquinaria, además de su movimiento vertical-rotatorio, cuenta con un movimiento horizontal, lo que facilita la excavación de todo el sector anular al mismo tiempo.
- El mismo taladro realiza una perforación de mayor diámetro en los extremos del sector anular, donde se coloca una tubería que sirve de límite del sector en ambos extremos (imagen 2.29).
- Una vez terminada la excavación de este sector se ponen las parrillas de armado y se procede al colado del muro de la lumbrera con concreto a través de un tubo Tremie, desplazando el lodo bentonítico por diferencia de densidades.
- Una vez que el concreto ha fraguado lo suficiente, se retira la tubería y se procede a la excavación del siguiente sector, quedando la junta de colado.

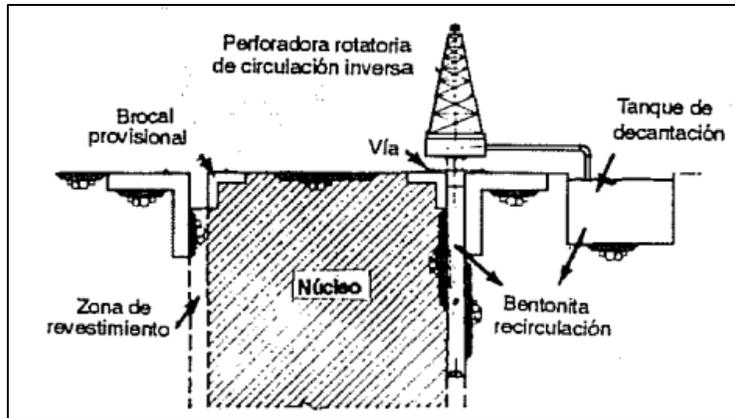


Imagen 2.28. Proceso de excavación de la zanja anular.

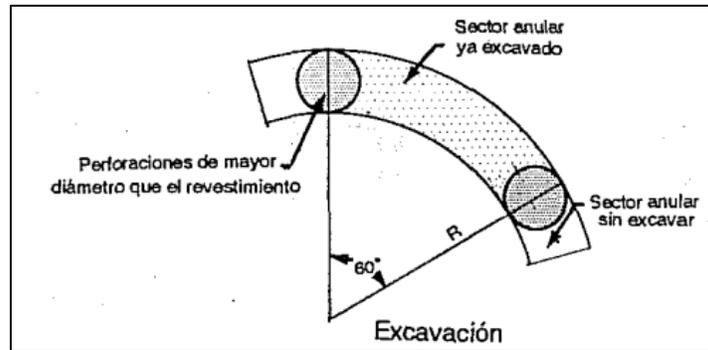


Imagen 2.29. Colocación de tubería límite para el sector anular ya excavado.

- Después de colar todo el muro de la lumbrera, se excava el núcleo empleando una almeja, y si no se presentan expansiones importantes, no es necesario estabilizar el fondo con agua o lodo bentonítico. Si a medida que avanza la excavación del núcleo de la lumbrera se encuentran escurrimientos fuertes por las juntas, se procede a hacer un barreno para inyección de lechada (imagen 2.30).

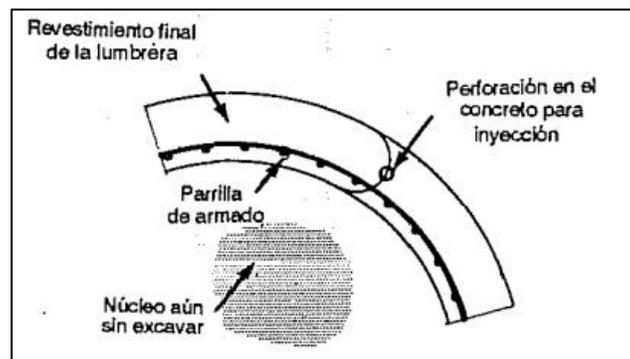


Imagen 2.30. Inyección de lechada a través de las juntas de colado.

### 3 CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA

#### 3.1 Ubicación

La Cuenca del Valle de México está integrada por gran parte del territorio de la Ciudad de México, una parte del Estado de México, el sur del estado de Hidalgo, el sureste de Tlaxcala y una pequeña parte del estado de Puebla; a su vez se compone de cuatro valles, al sur se encuentra el Valle de México, al noroeste el Valle de Cuautitlán, al noreste el Valle de Apan y al norte el Valle de Tizayuca (Escamilla y Santos, 2012), como se muestra en la imagen 3.1. La Cuenca del Valle de México cuenta con terrenos semiplanos en los que alguna vez estuvieron los lagos de Chalco, Zumpango y Xaltocan al norte, Xochimilco y Chalco al sur, y el de Texcoco al centro de la extensión de lagos (Escamilla y Santos, 2012).



Imagen 3.1. Cuenca de México (Escamilla y Santos, 2012).

El análisis de estabilidad de la lumbrera flotada en arcilla blanda, objeto de este trabajo, se sitúa cercano al municipio de Texcoco, en la zona de lago (imagen 3.2).

Este sitio se encuentra dentro de la zona lacustre o zona tres del mapa de zonificación geotécnica de la Ciudad de México, la cual se caracteriza por estar integrada de potentes depósitos de arcilla altamente compresible, los cuales se separan por capas de arena con diferentes contenidos de arcilla o limo (Ciudad de México, 2017). Los depósitos lacustres se encuentran normalmente cubiertos superficialmente por suelos aluviales, materiales desecados y rellenos artificiales (Ciudad de México, 2017).

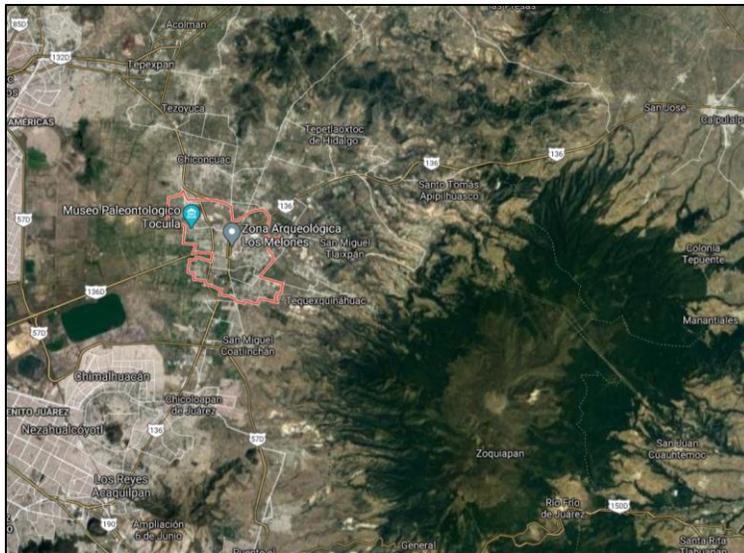


Imagen 3.2. Municipio de Texcoco (remarcado en color rojo).

### 3.2 Geología de la zona de estudio

La Cuenca de México se sitúa en el centro de la Faja Volcánica Transmexicana (Rodríguez, 2010), y su origen está vinculado con la tectónica regional que controla la disposición y procesos eruptivos de dicha faja (Tenorio, 2009). La Cuenca de México es de tipo endorreica o cerrada, está delimitada por la sierra de Tepoztlán, Tezontlalpan y Pachuca al norte; la sierra de Calpulalpan y la sierra Nevada al este; la sierra de Chichinautzin al sur; y las sierras de las Cruces, Monte Alto y Monte Bajo al oeste (Tenorio, 2009).

La geología representativa del área de estudio está dada por la formación Qhoal (Aluvión) como se muestra en la imagen 3.3, formada en el periodo Cuaternario de la era Cenozoica, el aluvión son partículas erosionadas por acción del agua, dependiendo de la energía del agua es el tamaño de las partículas que se encontrará en los depósitos.



Imagen 3.3. Geología representativa del área de estudio.

### 3.3 Estratigrafía general de la Zona de Lago

Se identifican las formaciones típicas del subsuelo de la Ciudad de México (Murillo, 2015) del modelo estratigráfico propuesto por Marsal y Mazari en 1959 (Tenorio, 2009):

**Capa Superficial o Costra Superficial (CS):** se compone de restos de construcciones, rellenos arqueológicos y depósitos aluviales, con lentes de material eólico intercalado (Tenorio, 2009).

Está representada por suelos arcillosos y limosos sometidos a secado, actualmente en algunas zonas se encuentran sobre ella escombros de demolición de los sismos de 1985 en la zona poniente, y en el sur y poniente varios metros de basura en proceso de degradación (Murillo, 2015).

En general presenta un espesor pequeño, los espesores mayores se localizan en el suroeste del Lago de Texcoco y varían entre los 3.0 y 4.5 metros aproximadamente, mientras que en la zona federal del ex Lago los espesores varían entre 0.5 y 1.5 metros (Rodríguez, 2010).

**Formación Arcillosa Superior (FAS):** está constituida por arcillas de origen lacustre que a mayor profundidad y por efecto de la consolidación inducida debido a sobrecarga superficial y bombeo profundo, se presentan como materiales preconsolidados o normalmente consolidados; además se encuentran intercalados horizontes de materiales endurecidos por secado solar, lentes de arena y vidrio volcánico (Tenorio, 2009).

Las intercalaciones también pueden estar compuestas por acarreos de los ríos del oriente y por aluviones de las descargas del norte al sur de los antiguos lagos de Zumpago y Xaltocan (Murillo, 2015).

La distribución espacial de la profundidad de la FAS en la zona del Lago de Texcoco cercana al Aeropuerto Benito Juárez de la Ciudad de México y a la zona de Aragón varía entre los 3.0 y 4.5 metros (Rodríguez, 2010). El espesor de esta capa es mayor en las zonas del ex Lago de Texcoco y Nezahualcoyotl alcanzando hasta los 40 metros (Rodríguez, 2010).

**Capa Dura (CD):** esta capa está compuesta por limos arenosos cementados con poca arcilla, también puede presentarse grava (Tenorio, 2009).

Está formada a partir de las últimas erupciones provenientes del cerro de San Miguel en la región central de la Sierra de las Cruces (Instituto de Ingeniería UNAM, 2014).

La distribución espacial de la profundidad de la CD en el Lago de Texcoco cerca al área del Peñón de los Baños y la zona de lomas registra la menor profundidad, mientras que las mayores profundidades se localizan al sur poniente de la zona en los terrenos aledaños al aeropuerto de la Ciudad de México (Rodríguez, 2010). El espesor de esta capa es menor en el área cercana a los lagos y lagunas de la zona federal y varía entre los 0.5 y 1 metro, mientras que los espesores mayores se localizan en la zona de Nezahualcáyotl (Rodríguez, 2010).

**Formación Arcillosa Inferior (FAI):** está constituida por una secuencia de arcillas lacustres intercalada por lentes duros (Tenorio, 2009).

Al igual que en la capa dura, la distribución espacial de la profundidad de la FAI en áreas cercanas al Peñón de los Baños y la zona de lomas registra las menores profundidades, mientras que las mayores se localizan al suroeste de la zona en los terrenos aledaños al aeropuerto internacional de la Ciudad de México (Rodríguez, 2010). El mayor espesor de esta capa se presenta cerca del aeropuerto Benito Juárez alcanzando los 40 metros, y va disminuyendo al acercarse a la zona de serranía llegando hasta los 5 metros (Rodríguez, 2010).

**Depósitos Profundos (DP):** está constituido por arenas y gravas limosas de origen aluvial contenidas dentro de una matriz de arcilla, también se han encontrado carbonatos de calcio en estos depósitos (Tenorio, 2009).

La distribución espacial de la profundidad de los DP en el Lago de Texcoco presenta las profundidades menores en áreas cercanas al Peñón de los Baños y la zona de lomas, y en la dirección suroeste (aeropuerto, Ciudad Nezahualcóyotl y la extensión del ex Lago de Texcoco) las mayores profundidades (Rodríguez, 2010).

Dentro de las formaciones arcillosas se encuentran intercalados horizontes más duros que están relacionados con las emisiones volcánicas recientes, como cenizas y pómez; sin embargo, estos horizontes también pueden corresponder a capas arenosas-limosas aluviales, los cuales son más importantes cercanos a la zona de transición, al norte y oriente (Instituto de Ingeniería UNAM, 2014).

### **3.4 Exploración Geotécnica**

La exploración geotécnica tiene como objetivo definir las propiedades físicas y mecánicas del suelo del sitio de interés, en el caso de este trabajo la propiedad de interés es la resistencia al corte, obtenida por métodos de exploración como el sondeo mixto y el sondeo con cono eléctrico, pruebas in situ como la de veleta o pruebas de laboratorio como la de compresión triaxial; para posteriormente establecer el modelo geotécnico del sitio donde se construirá la lumbera.

#### **3.4.1 Sondeo mixto**

Con las muestras obtenidas del sondeo de penetración estándar (SPT) y tubo Shelby, se obtuvo el siguiente perfil estratigráfico del área:

En general en los primeros 32.5 metros se distingue una formación superior arcillosa con arcillas de colores que varían entre el gris verdoso, verde olivo y café rojizo, de consistencia muy blanda, con presencia de algunas vetas de arena fina y vidrio volcánico.

A partir de los 32.5 metros se encuentra una pequeña capa de arena limosa color café grisáceo de compacidad densa de aproximadamente 40 centímetros, seguida por una capa de limo color verde olivo y gris olivo de consistencia firme de un metro de espesor.

A continuación, se muestra una capa de arcilla con arena fina color verde olivo, de consistencia blanda, y después de medio metro de profundidad se encuentra arcilla color verde olivo de consistencia media a muy blanda, hasta llegar a 38.5 metros de profundidad.

Después se encuentra una pequeña capa de 30 centímetros de vidrio volcánico con arena fina; a partir de los 38.8 y hasta los 48.5 metros se presenta arcilla de consistencia muy blanda a firme con colores que varían entre el gris verdoso, verde olivo y café rojizo, además presenta algunas vetas de arena fina, arena gruesa y vidrio volcánico.

A los 48.5 y hasta los 53.5 metros se encuentra una capa de limo color verde olivo y gris olivo de consistencia dura, seguida de 3.7 metros de arena con limo color verde olivo de compacidad muy densa.

A partir de los 57.2 metros de profundidad y hasta los 60.8 se encuentra una capa de arcilla de color verde olivo claro, cuya consistencia varía de media, firme, muy firme a dura. A esta le sigue una capa de arcilla que llega hasta los 76 metros de profundidad, es de color gris oscuro, verde olivo y café olivo, en su mayoría presenta una consistencia blanda, sin embargo, hay algunos horizontes de consistencia media, muy firme y dura, además, se presentan una capa de vidrio volcánico de apenas 20 centímetros de espesor y una de arena arcillosa de 0.5 metros de espesor de compacidad muy densa.

Desde los 76 y hasta los 90.5 metros de profundidad se encuentra una capa de limo gris oscuro y verde olivo, de consistencia que varía de blanda a dura, hay algunos horizontes que tienen limo con arena fina, y una intercalación de arena fina a gruesa de color gris claro de compacidad muy densa.

Con la descripción anterior se puede distinguir el espesor de cada una de las capas propuestas por el modelo estratigráfico de Marsal y Mazari en 1959 (Tenorio, 2009):

- 0.5 metros de capa superficial CS
- 32 metros de la formación arcillosa superior FAS.
- 1.4 metros de capa dura CD.
- 14.8 metros de la formación arcillosa inferior FAI.
- 8 metros depósitos profundos DP, aproximadamente.

El nivel de aguas freáticas (NAF) se encuentra a 0.50 metros de profundidad.

### **3.4.2 Prueba de veleta**

La prueba consiste en colocar una veleta de cuatro palas en el suelo no perturbado y rotarla desde la superficie con una varilla para determinar la fuerza de torsión requerida para hacer cortar una superficie cilíndrica por la veleta, esta fuerza luego se convierte en una unidad de resistencia al corte de la superficie cilíndrica (ASTM, 1994).

Se realiza un barreno poco profundo y se introduce la veleta mediante varillas hasta el fondo, posteriormente se inca la veleta con un solo empuje hasta la profundidad a la que se desea realizar la prueba; el diámetro del barreno es de 10 centímetros y la veleta se hinca a una profundidad de 40 centímetros o cuatro veces el diámetro del barreno (ASTM, 1994).

Con la veleta en posición se le aplica fuerza de torsión para hacerla rotar de 0° a 180° con una tasa que no exceda 0.1 °/s, durante la rotación se registra el esfuerzo de torsión o par con ayuda de un torquímetro y el desplazamiento angular, el esfuerzo de torsión máximo o pico se determina como la resistencia no drenada pico,  $s_{up}$  (ASTM, 1994).

Después de obtener el par máximo, se gira la veleta rápidamente un mínimo de 10 revoluciones para el remoldeado, la determinación de la resistencia residual o remoldeada ( $s_{ur}$ ) debe iniciarse inmediatamente después de completar la rotación rápida y se obtiene de la misma manera que la resistencia no drenada pico, se aplica fuerza de torsión para hacerla rotar de  $0^\circ$  a  $180^\circ$  con una tasa que no exceda  $0.1$  %/s y durante la rotación se registra el esfuerzo de torsión y el desplazamiento angular (ASTM, 1994).

A partir de la obtención de la resistencia pico y la resistencia residual se pudo obtener la sensibilidad in situ del suelo ( $s_t$ ).

Los resultados obtenidos de la prueba se muestran en la tabla 3.1, y a partir de estos se construyó un gráfico de profundidad contra resistencia pico  $s_{up}$  mediante el cual se pudo modelar la resistencia con una ecuación en función de la profundidad (imagen 3.4).

### 3.4.3 CPTu (Sondeo con cono eléctrico)

El sondeo detecto el nivel de aguas freáticas a una profundidad de 0.80 metros, en la imagen 3.5 se observan los resultados obtenidos del sondeo.

La resistencia al corte no drenada ( $s_u$ ), no tiene un valor único, ya que la respuesta del suelo sin drenaje depende de la dirección de carga, la anisotropía y tasa de deformación del suelo, e historial de esfuerzos (Robertson y Cabal, 2014).

Dado que la anisotropía y velocidad de deformación influyen inevitablemente en los resultados de la prueba, su interpretación requiere de contenido empírico para tener en cuenta estos factores. Las soluciones teóricas han proporcionado información valiosa sobre la forma de relacionar la resistencia al cono y  $s_u$ . Todas las teorías resultan en una relación entre la resistencia del cono corregida ( $q_t$ ) y  $s_u$  de la forma (Robertson y Cabal, 2014):

$$s_s = q_t - \sigma_v / N_{kt}$$

Normalmente  $N_{kt}$  varía de 10 a 18, tiende a ser mayor al aumentar la plasticidad, y es menor al aumentar la sensibilidad del suelo.  $N_{kt}$  disminuye a medida que aumenta la relación de presión de poro ( $B_q$ ), en suelos muy sensibles de grano fino donde  $B_q$  es aproximadamente uno,  $N_{kt}$  puede ser tan bajo como 6 (Robertson y Cabal, 2014).

Por ejemplo, la arcilla sensible o sensitiva, es aquella que pierde su resistencia al corte al ser remoldeada, o alterada de algún modo, al punto que puede fluir bajo la acción de la gravedad (Geotecnia Online, 2020). La sensibilidad  $s_t$  de la arcilla se define como la relación entre la resistencia al corte no drenada máxima no perturbada y la resistencia al corte no drenada totalmente remoldeada (Robertson y Cabal, 2014).

Para el caso de las arcillas del Ex Lago de Texcoco el valor de  $N_{kt}$  fue de 6.6, este valor se obtuvo con la mejor aproximación del sondeo de cono eléctrico con la prueba de veleta, como se muestra en la imagen 3.6.

Con este sondeo también se determinó la presión de poro, la presión hidrostática y además se realizaron pruebas de disipación de presión de poro, dichos resultados se muestran en la imagen 3.5.

Tabla 3.1. Resultados de la prueba de veleta.

<b>Profundidad [m]</b>	<b>s<sub>up</sub> [kPa]</b>	<b>s<sub>ur</sub> [kPa]</b>	<b>s<sub>t</sub></b>
1.5	22.3	5.4	4.1
3.5	15.4	5.1	3.0
5	17	5.0	3.4
6.5	19.2	5.4	3.6
8.5	21.1	6.4	3.3
10	22.1	4.7	4.7
11.5	25.9	6.0	4.3
13	31.8	5.5	5.7
14.5	21.8	6.7	3.2
16	30.7	6.9	4.4
17.4	38.4	8.7	4.4
18.8	31.1	7.8	4.0
20.3	28.5	9.8	2.9
21.9	33.7	10.4	3.3
23.3	37.4	12.1	3.1
24.8	31.9	9.9	3.2
26.8	37	10.3	3.6
28.3	38.7	12.5	3.1
29.8	44.9	15.3	2.9
30.8	50.9	16.2	3.1
32.2	49.4	15.6	3.2

### 3.4.4 Prueba de compresión triaxial UU

Se realizaron tres pruebas de compresión triaxial no drenada no consolidada, en la tabla 3.2 se muestran los resultados obtenidos. En el gráfico de la imagen 3.6 se observan los valores obtenidos de la prueba y su aproximación con los de la prueba de veleta.

Tabla 3.2. Resultados de la prueba de compresión triaxial UU.

<b>Muestra</b>	<b>Profundidad [m]</b>	<b>Cohesión aparente [kPa]</b>
1	4.2	14
2	14.7	30
3	23	28

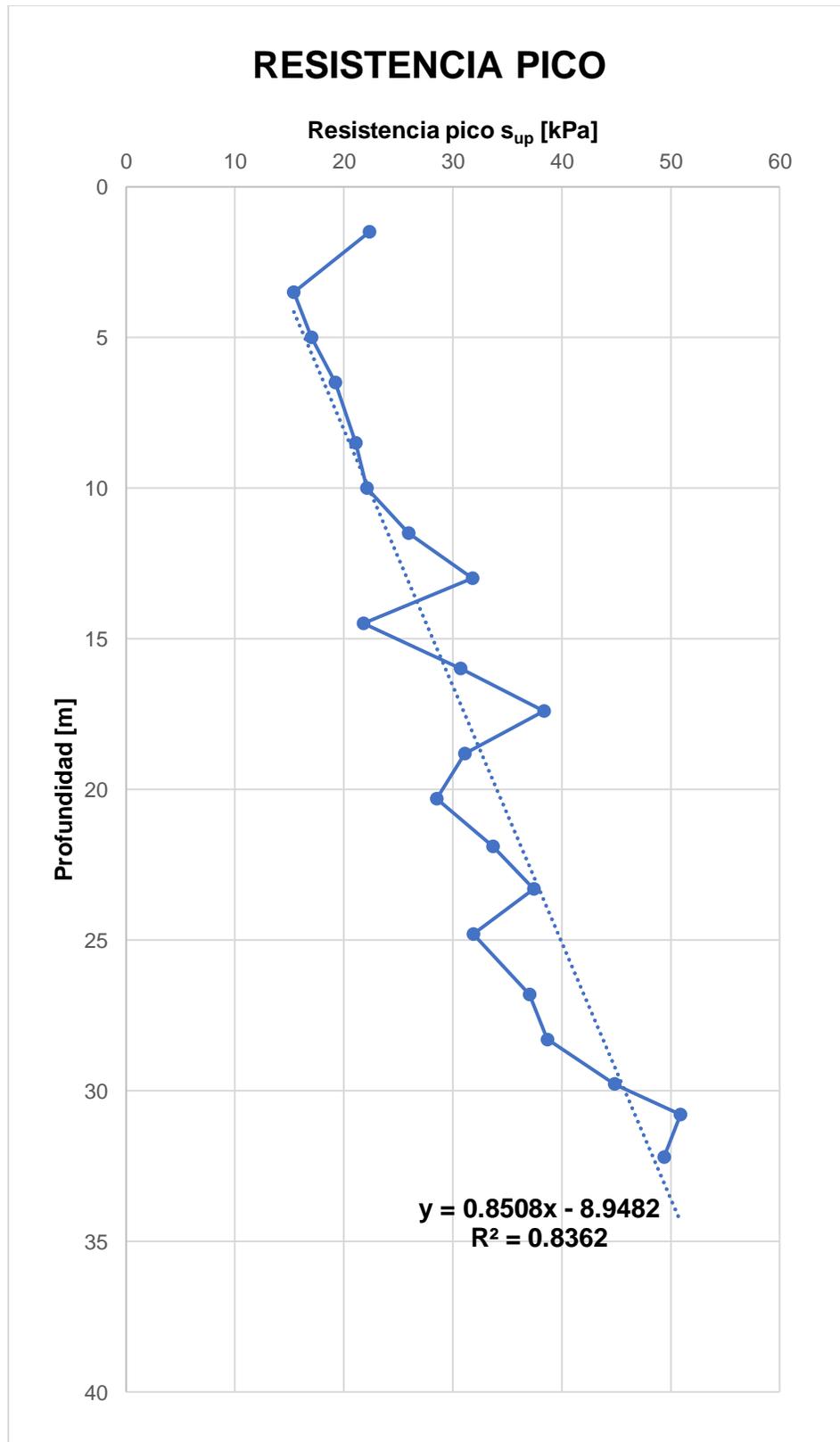


Imagen. 3.4. Gráfico de profundidad contra resistencia pico  $S_{up}$ .

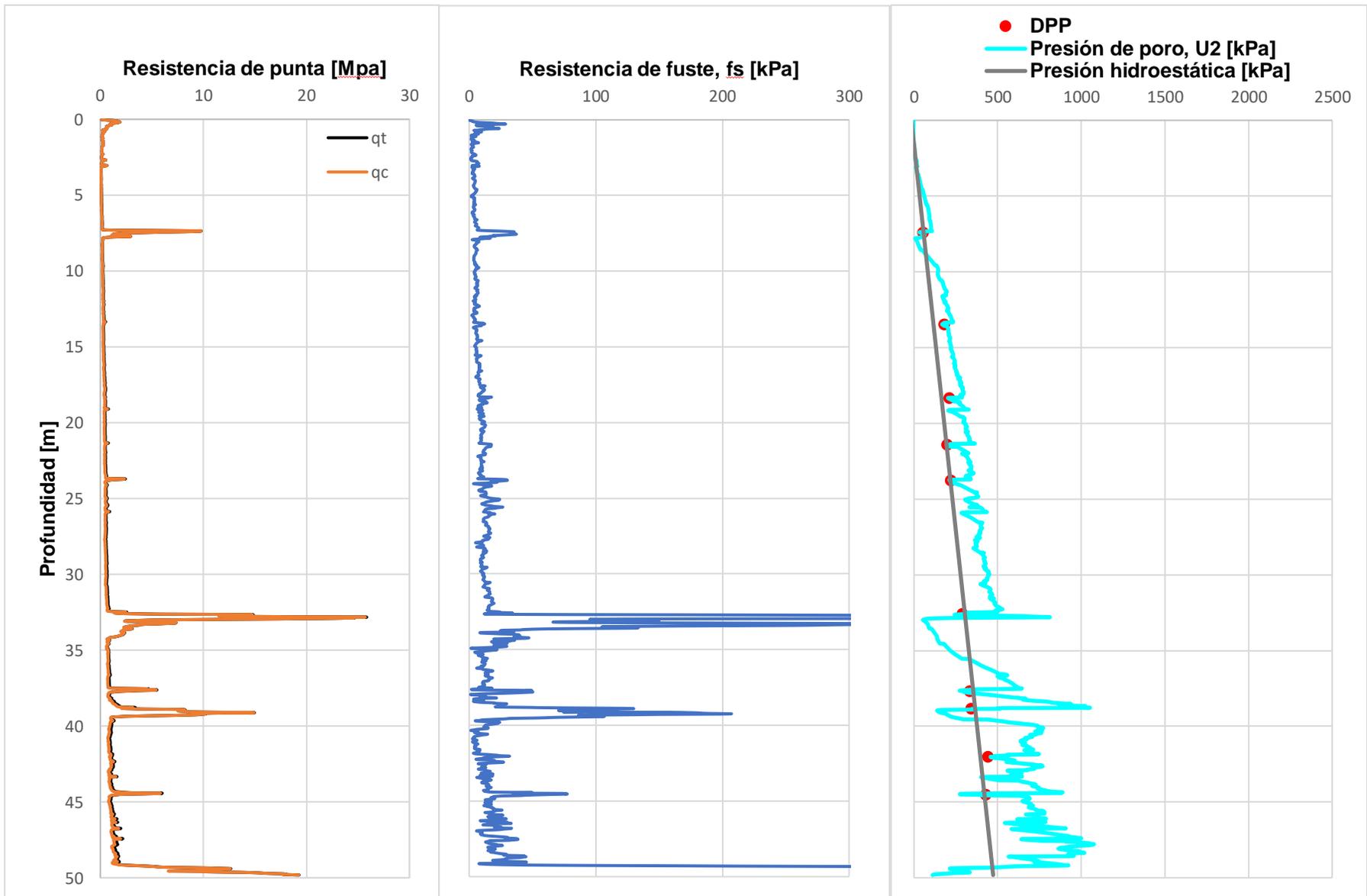


Imagen 3.5. Resultados obtenidos del sondeo con cono eléctrico.

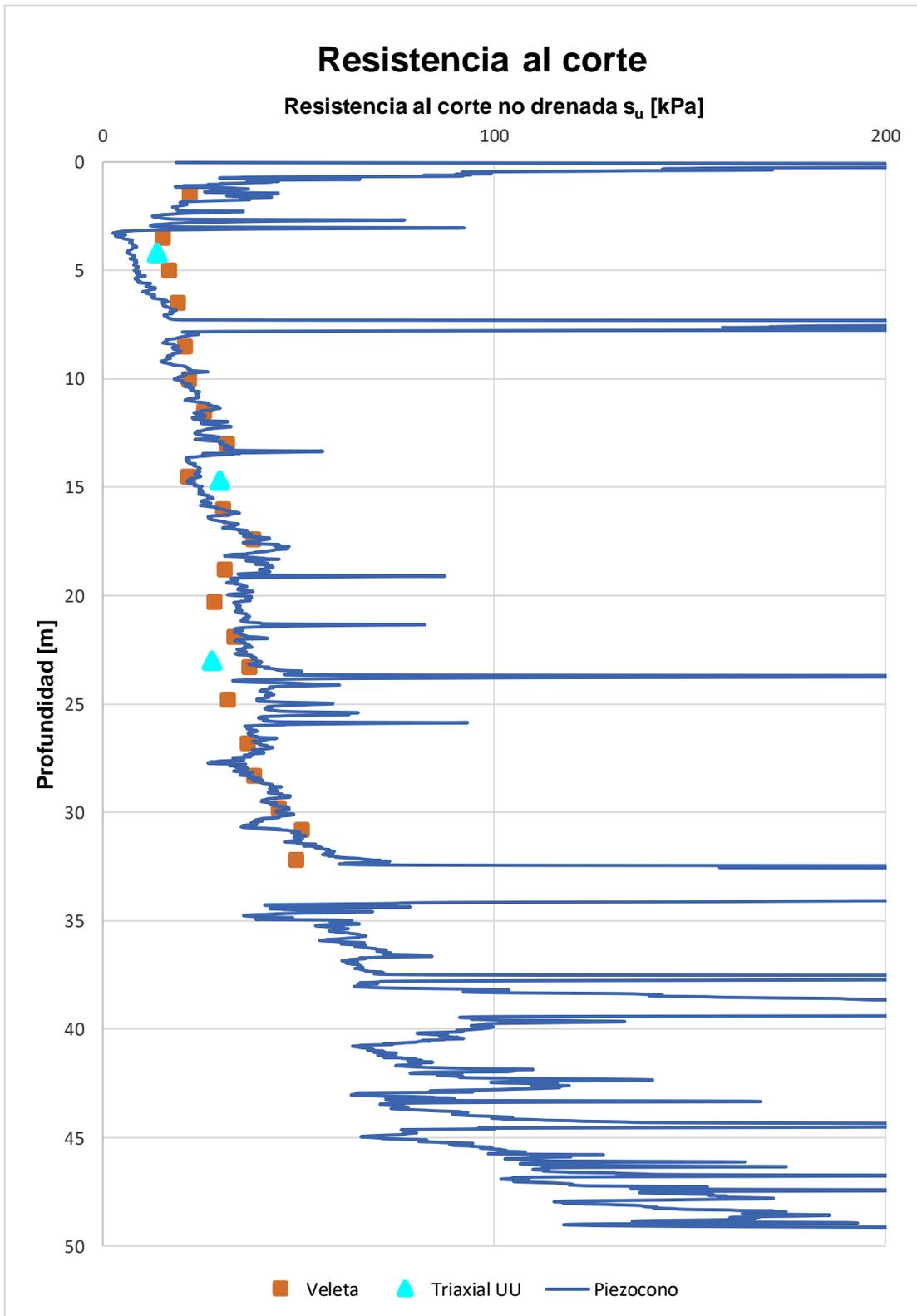


Imagen 3.6. Comparación de las tres pruebas de resistencia al corte.

### **3.5 Descripción de los datos obtenidos de la exploración geotécnica**

A partir del sondeo de penetración estándar (SPT) y sondeo con cono eléctrico (CPTu), se determinó la estratigrafía del sitio en estudio, la cual es congruente con la estratigrafía típica de la zona de lago.

- Capa o costra superficial (CS) con espesor de 0.5 metros.
- Formación arcillosa superficial (FAS) con espesor de 32 metros.
- Capa dura (CD) con espesor de 1.5 metros.
- Formación arcillosa inferior (FAI) con espesor de 15 metros.
- Depósitos profundos (DP) con espesor de 8 metros.

La presencia del nivel freático se encontró a 0.5 metros de profundidad, y la piezometría es hidroestática hasta los 34 metros, es decir, hasta la capa dura (CD), a mayor profundidad se abate alcanzando un abatimiento máximo de 66.33% hasta la profundidad máxima de exploración del cono eléctrico que es de 75 metros.

Con métodos de campo y laboratorio se definieron las unidades geotécnicas características del sitio, a partir de los valores de resistencia al corte. Aunque la resistencia se obtuvo con tres métodos diferentes, veleta, cono eléctrico y resistencia a la compresión simple UU, los valores que se utilizaron para determinar las unidades geotécnicas fueron los de la prueba de veleta, y ya que estos se obtuvieron hasta una profundidad de 34 metros, es hasta esa profundidad que se definieron las unidades.

En la tabla 3.3 se muestran las características y propiedades de cada unidad geotécnica definida, y su relación con la estratigrafía típica de la zona de lago.

### **3.6 Modelo geotécnico**

A partir de las características de las unidades geotécnicas se realizó el modelo geotécnico, en la imagen 3.7 se muestra la vista transversal del esquema de construcción de la lumbrera (0-0'), ésta posee una profundidad de 27.6 metros y su construcción se ve influenciada por la presencia de la Capa Dura que es un estrato permeable a 32.5 metros de profundidad.

En la imagen 3.8 se muestra el modelo geotécnico con base en el gráfico de resultados de la prueba de cono eléctrico, hasta la profundidad de 34 metros, en él se muestran seis unidades geotécnicas, siendo la de color gris el lente de arena (Capa Dura).

En la imagen 3.9 se muestra el esquema de la lumbrera (0-0') con las seis unidades geotécnicas que intervienen en la construcción de esta y que se revisan para el análisis de estabilidad de la misma.

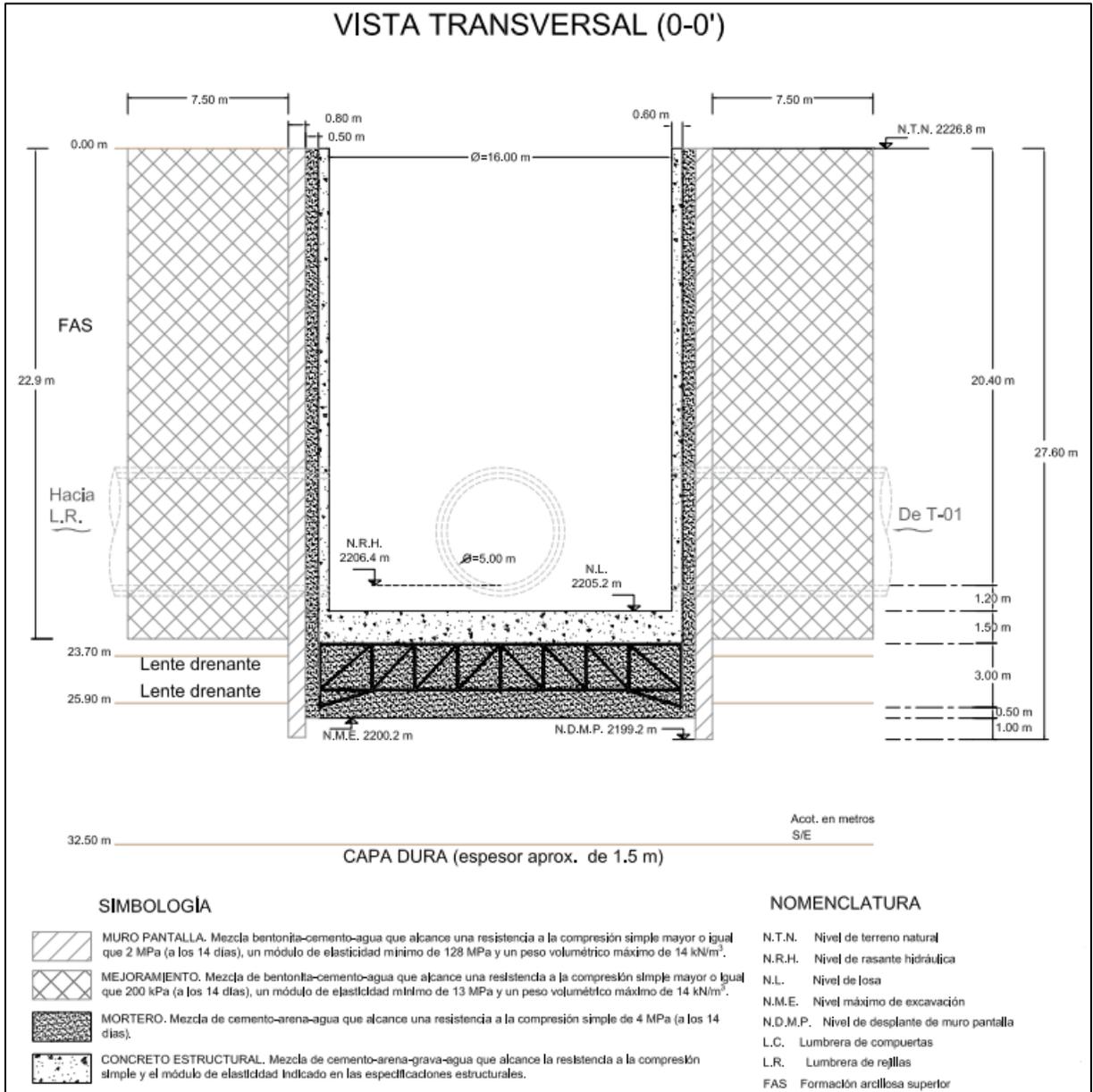


Imagen 3.7. Esquema de construcción de la lumbreira (0-0').

Tabla 3.3. Características y propiedades de las unidades geotécnicas.

Unidad geotécnica	Espesor [m]	Formación	S <sub>up</sub> promedio [kPa]	Peso volumétrico [kN/m <sup>3</sup> ]	Contenido de agua promedio [%]	Porcentaje de finos		Clasificación SUCS	Tipo de material
						Arcilla [%]	Arena [%]		
UG-1	3.5	CS y FAS	22.30	11.30	329.33	100	0	CH	Arcilla color gris, gris verdoso y verde olivo de consistencia muy blanda.
UG-2	3.8	FAS	16.20	11.30	329.33	100	0	CH	Arcilla color verde olivo y café rojizo, de consistencia muy blanda de alta plasticidad.
UG-3	4.2	FAS	20.80	11.69	264	99.1	0.9	CH	Arcilla color café rojizo y verd olivo con manchas café, de consistencia muy blanda de alta plasticidad.
UG-4	12	FAS	30.24	12.01	284	98.9	1.1	CH	Arcilla color café rojizo, gris verdoso y verde olivo, de consistencia muy blanda de alta plasticidad.
UG-5	9	FAS	41.46	11.53	331	99.7	0.3	CH	Arcilla color gris verdosa y verde olivo, de consistencia muy blanda de alta plasticidad.
UG-6	1.5	CD							Arena limosa color café grisáceo, de compacidad densa y limo color verde olivo y gris olivo, de consistencia firme. Arcilla con arena fina color verde olivo, de consistencia blanda.

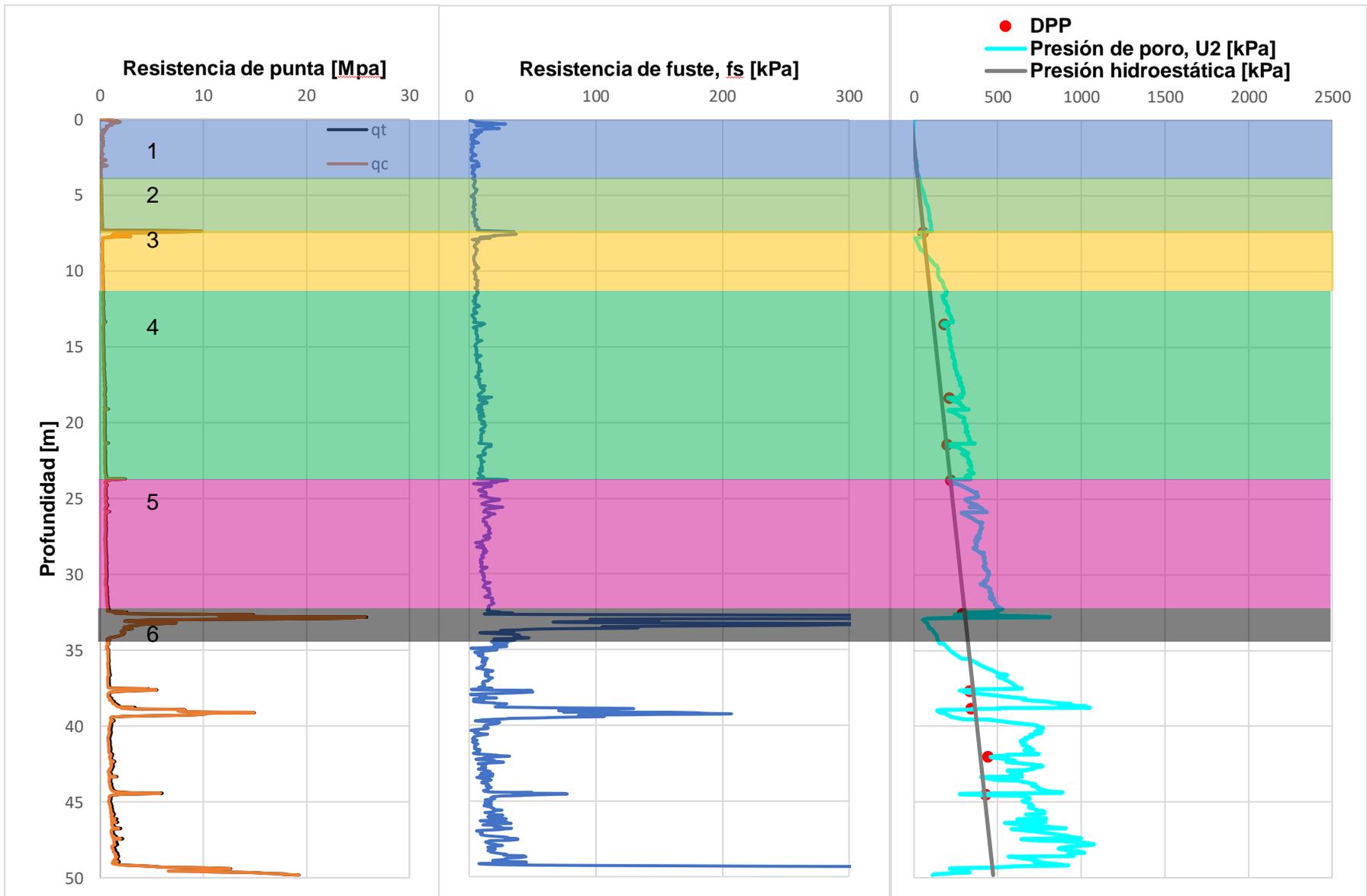


Imagen 3.8. Modelo geotécnico basado en la prueba de cono eléctrico.

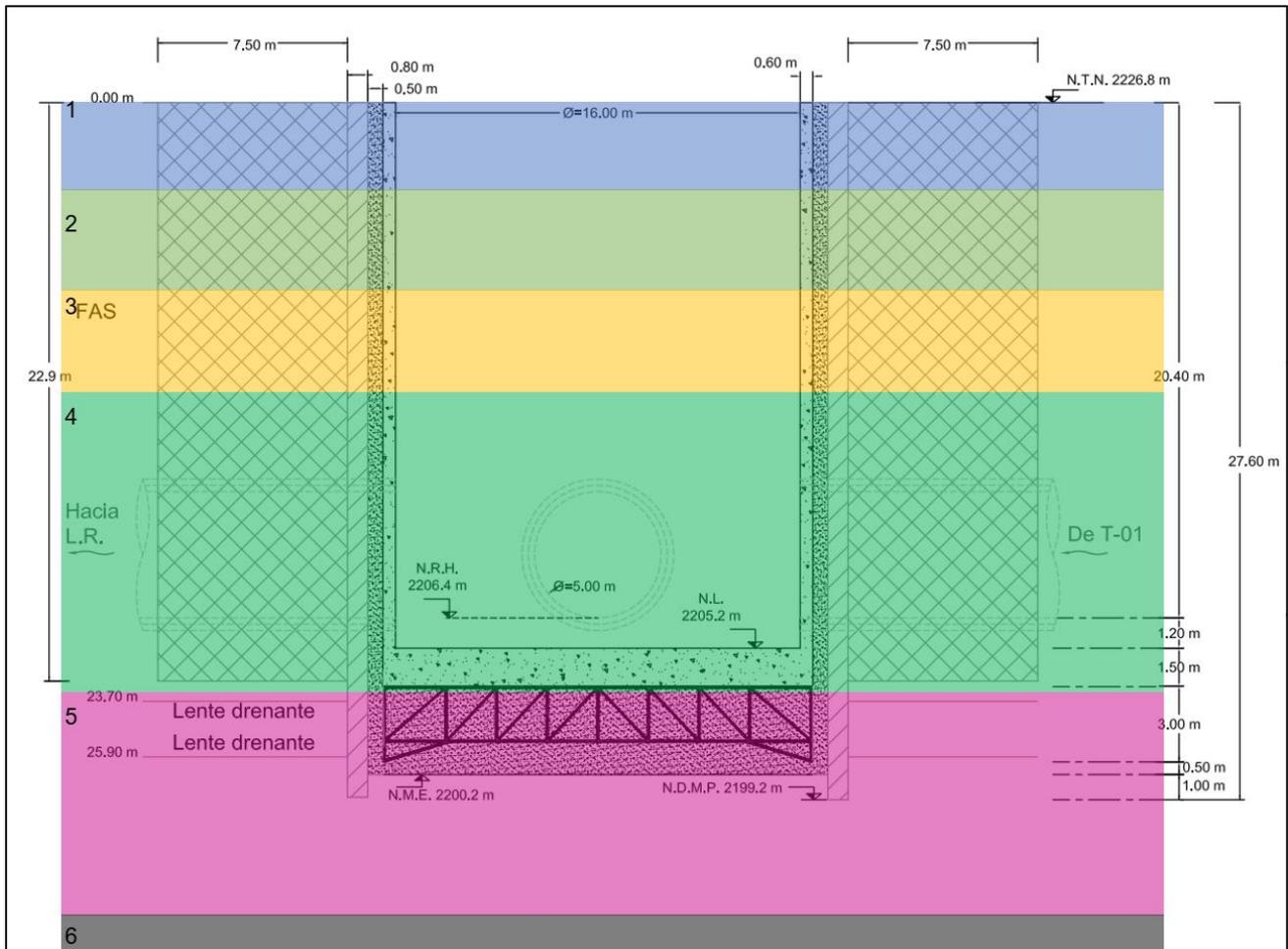


Imagen 3.9. Modelo geotécnico del esquema de construcción de la lumbreira (0-0').

En la imagen 3.10. se muestra un gráfico de la resistencia al corte no drenada medida con la prueba de cono eléctrico, de veleta y compresión triaxial contra profundidad, y a partir de este se realizó un modelo geotécnico donde se muestran las seis unidades geotécnicas de interés.

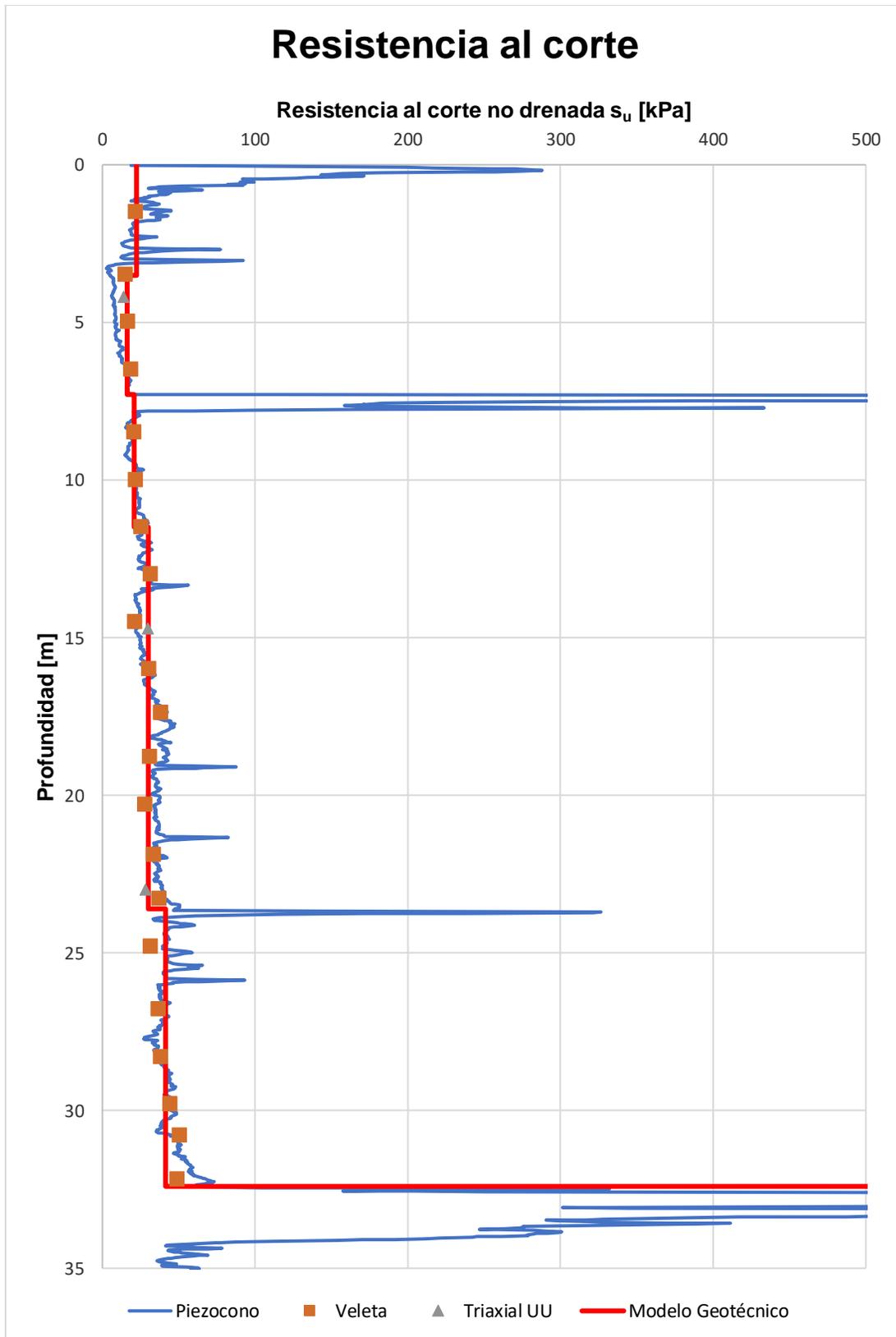


Imagen 3.10. Modelo geotécnico del gráfico de resistencia al corte contra profundidad.

## 4 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD

### 4.1 Estabilidad de las paredes

El lodo bentonítico introducido durante la excavación de la zanja perimetral en el proceso constructivo de lumbera flotada, forma en sus paredes una costra debido a la pérdida local de agua que sufre, formando así una especie de membrana impermeable que permite el desarrollo y aplicación de la presión del fluido estabilizador a las paredes de la excavación (Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, A.C., 2002). El colapso de una excavación en la zanja perimetral implica el desarrollo de una superficie de falla que define un prisma susceptible a deslizarse, compuesto por la masa de suelo que lo constituye (Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, A.C., 2002).

El análisis consiste en examinar el equilibrio del prisma de ancho unitario que es susceptible a deslizarse, a través de una superficie de falla a  $45^\circ$  de inclinación; en cuanto al fluido estabilizador, la profundidad a la que se maneje, es decir, el tirante libre sin lodo junto con su peso específico condicionan la magnitud del empuje hidrostático que se puede desarrollar. En estas condiciones, el factor de seguridad se evalúa considerando la cohesión total que se desarrolla en la superficie de falla para mantener el prisma en equilibrio (Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, A.C., 2002).

#### 4.1.1 Análisis con el criterio Noruego

En 1976 el Profesor Aas del Instituto Geotécnico Noruego analizó el equilibrio de dos prismas de ancho igual a la longitud de la zanja abierta, como se muestra en la imagen 4.1, estos prismas completos sufren deslizamientos horizontales y verticales a través de planos inclinados a  $45^\circ$  originando la falla (Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, A.C., 2002); donde el bloque inferior se mueve horizontalmente hacia el interior de la zanja, y al mismo tiempo el bloque superior se mueve verticalmente hacia el interior del terreno (CONAGUA, 2007).

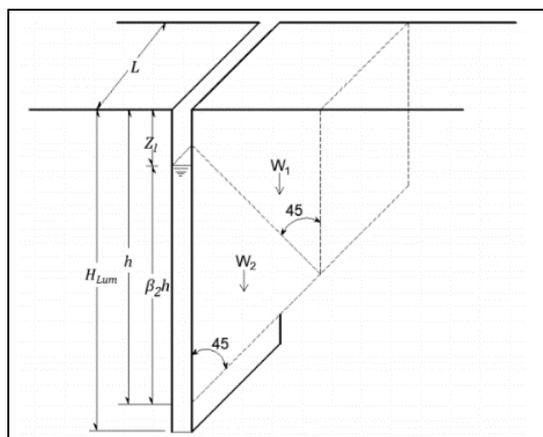


Imagen 4.1. Condiciones de falla Aas, 1976.

En dicho análisis se supone que a lo largo de los dos planos inclinados a 45° las condiciones de esfuerzo corresponden a un estado de falla activa, por lo que la resistencia al esfuerzo cortante movilizada a lo largo de estos planos es igual a la medida en el ensaye de compresión triaxial, mientras que en las superficies verticales de deslizamiento se utiliza la resistencia medida con la prueba de veleta (CONAGUA, 2007); dichas suposiciones conducen a la siguiente expresión de factor de seguridad (Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, A.C., 2002):

$$FS = \frac{c_v}{h(\gamma - \beta_2^2 \gamma_l)} \left[ 2 \frac{c_T}{c_v} + 0.94 \frac{h}{L} \right]$$

donde:

$c_v$  resistencia al corte con veleta, en kPa.

$c_T$  resistencia al corte con compresión triaxial no drenada, en kPa.

$\gamma$  peso volumétrico del suelo excavado, en kN/m<sup>3</sup>.

$\gamma_l$  peso volumétrico del fluido estabilizador, en kN/m<sup>3</sup>.

$h$  profundidad de análisis de la cuña de falla, en m.

$H_{lum}$  profundidad de la excavación, en m.

$\beta_2$  relación entre la profundidad de análisis de la cuña de falla ( $h$ ) y la profundidad del fluido estabilizador ( $z_l$ ).  $\beta_2 = 1 - \frac{z_l}{h}$

En el Manual de Diseño de Obras Civiles, capítulo Túneles y Lumbreras en Suelos, publicado en 2018 por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y el Instituto de Ingeniería de la UNAM, se presenta la siguiente ecuación para realizar el análisis con el método noruego:

$$FS = \frac{c_u}{h(\gamma - \beta_2^2 \gamma_l)} \left[ 2 + 0.94 \frac{h}{L} \right]$$

En ella se observa que el valor de la resistencia al corte con veleta ( $c_v$ ) en la primera parte de la ecuación es sustituido por la resistencia al corte no drenada promedio a lo largo de la superficie potencial de falla ( $c_u$ ); mientras que en la segunda parte los valores  $c_T/c_v = 1$ , esto se debe a que se considera indistinta la prueba de la cual se obtenga la resistencia al corte no drenada, ya sea de laboratorio (compresión triaxial) o en campo (veleta), sólo se considerara un valor de  $c_u$ . A la ecuación también se le puede agregar el efecto de la sobrecarga ( $q_s$ ) debido al equipo de excavación, como se muestra a continuación (CFE e Instituto de Ingeniería UNAM, 2018):

$$FS = \frac{c_u}{h(\gamma - \beta_2^2 \gamma_l) + \frac{2q_s}{h}} \left[ 2 + 0.94 \frac{h}{L} \right]$$

El factor de seguridad mínimo para la estabilidad de las paredes es de 1.5 (CFE e Instituto de Ingeniería UNAM, 2018).

## 4.2 Estabilidad del núcleo

Cuando se utiliza el método de la lumbrera flotada, es necesario verificar la estabilidad del núcleo cuando se excava la zanja perimetral, ésta puede ser verificada considerando el núcleo como una probeta de suelo ensayada en una prueba de compresión triaxial, donde la falla se producirá cuando el esfuerzo cortante desarrollado en la probeta sea mayor que su resistencia al corte no drenada ( $c_u$ ), como se muestra a continuación (CFE e Instituto de Ingeniería UNAM, 2018):

$$\tau = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$$

Bajo dicha condición, el núcleo central de suelo se encuentra sometido a un estado de esfuerzos horizontales  $\sigma_3 = \gamma_l(H_{lum} - z_l)$ , que es menor al esfuerzo horizontal inicial antes de la excavación  $\sigma_3 = K_0\gamma z$ ; siendo  $K_0$  el coeficiente lateral de tierras en reposo (CFE e Instituto de Ingeniería UNAM, 2018).

Por tanto, el factor de seguridad del núcleo se expresa como (CFE e Instituto de Ingeniería UNAM, 2018):

$$FS = \frac{2c_u}{(\sigma_1 - \sigma_3)} = \frac{2c_u}{\gamma H_{lum} - \gamma_l(H_{lum} - z_l)}$$

donde:

$\gamma_l$  peso volumétrico del lodo estabilizador, en  $\text{kN/m}^3$ .

$\gamma$  peso volumétrico del suelo, en  $\text{kN/m}^3$ .

$H_{lum}$  altura de la excavación de la lumbrera, en m.

$z_l$  profundidad a la que se maneja el lodo, es decir, tirante libre sin lodo, en m.

El factor de seguridad mínimo para la estabilidad del núcleo es de 1.1, en la imagen 4.2 se muestra un esquema donde se especifican los parámetros a considerar para verificar la seguridad de una lumbrera contra este tipo de falla (CFE e Instituto de Ingeniería UNAM, 2018).

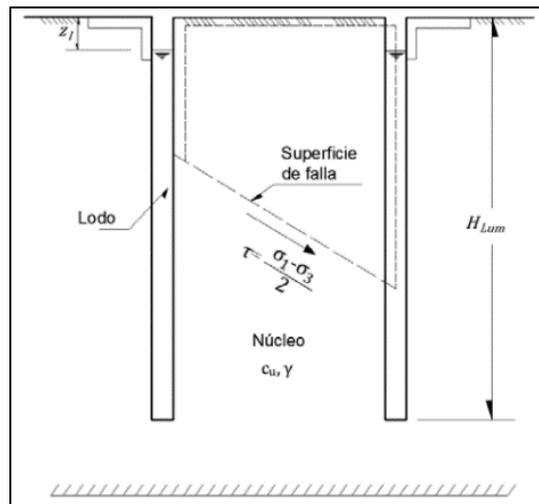


Imagen 4.2. Esquema de parámetros a considerar en la estabilidad del núcleo.

### 4.3 Estabilidad del fondo por cortante

La "Falla de fondo" (Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica, Secretaría General de Obras DDF, 1991) o falla de fondo por cortante en suelos como las arcillas blandas y saturadas, genera el levantamiento brusco del fondo y al mismo tiempo el hundimiento repentino de la superficie del terreno adyacente a la excavación, lo que provoca el colapso de la estructura de retención (Jiménez, 2018).

Terzaghi propuso un mecanismo para analizar la condición crítica de falla, representada por la sección transversal de una excavación ademada que posee una profundidad  $H$ , y en donde se considera que la longitud de la excavación y el espesor del estrato de arcilla ( $Z$ ) se extienden infinitamente (Jiménez, 2018). El mecanismo de falla que propone Terzaghi (imagen 4.3) está compuesto por un prisma de suelo con vértices en  $abc$ , de ancho  $B$  y longitud unitaria  $L = 1$  metro, cuyo peso es  $P$  (el cual incluye el valor de sobrecarga superficial unitaria  $p_s$ ), desarrollando sobre el plano  $co$ , una reacción vertical ascendente equivalente a la capacidad de carga  $Q$  del suelo, al moverse el prisma, se desarrolla una fuerza cortante vertical  $S$  sobre el plano  $bc$ , que junto con la reacción  $Q$  se oponen al deslizamiento del prisma  $P$  (Jiménez, 2018). En el mecanismo que propone Terzaghi se considera la resistencia media al corte no drenada en el plano  $bc$  ( $c_{u1}$ ), y la resistencia media al corte en la superficie  $cdef$  ( $c_{u2}$ ), sin embargo, al tener una arcilla homogénea de espesor ilimitado se pueden igualar dichas resistencias  $c_{u1} = c_{u2} = c_u$  (Jiménez, 2018).

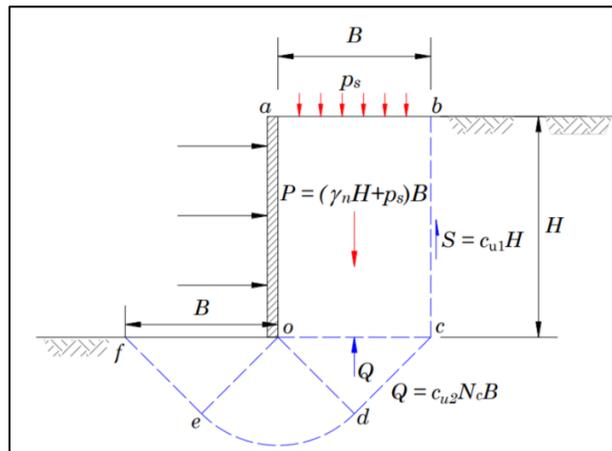


Imagen 4.3. Mecanismo de falla de fondo por cortante propuesto por Terzaghi.

Sin embargo, en la práctica el espesor  $Z$  del estrato de arcilla no es ilimitado, es por ello que debe considerarse el límite real demarcándolo con una frontera rígida (imagen 4.4.a), en cuyo caso el ancho mínimo de la excavación  $B$  del mecanismo de falla quedaría definido por  $B = 1.41 Z$ , y si el ancho de la excavación  $B_e < 1.41 Z$  (imagen 4.4.b), el ancho del mecanismo de falla será igual al de la excavación  $B = B_e$  (Jiménez, 2018).

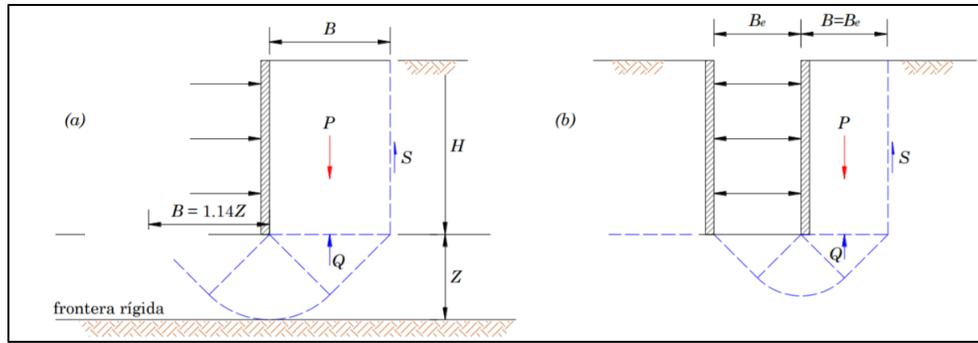


Imagen 4.4. Condiciones de frontera para el mecanismo de falla propuesto por Terzaghi.

Para el proceso constructivo de lumbreira flotada se consideran como fuerzas actuantes, el peso del cilindro de suelo hasta el nivel máximo de excavación y la sobrecarga en superficie que recibe (Aguilar et al, 2019); como fuerzas resistentes se consideran principalmente la capacidad de carga del terreno vecino al fondo de la excavación (Aguilar et al, 2019) y la presión que ejerce el lodo bentonítico en el interior de la excavación (Aguilar et al, 2019).

En la imagen 4.5 se muestra un esquema donde se especifican los parámetros a considerar para verificar la seguridad de una lumbreira contra este mecanismo de falla, el factor de seguridad mínimo que se debe considerar es de 1.5 y se calcula de la siguiente manera (CFE e Instituto de Ingeniería UNAM, 2018):

$$FS = \frac{c_u(N_c i_c s_c + \eta J)}{\gamma H + q_s - h_l \gamma_l}$$

donde

- $D$  diámetro de la lumbreira, en m.
- $d$  profundidad de empotramiento del sistema de retención, en m.
- $H_{lum}$  profundidad al fondo de la excavación, en m.
- $\gamma_l$  peso volumétrico del fluido estabilizador, en  $\text{kN/m}^3$ .
- $h_l$  altura del fluido estabilizador, en m.
- $H'$  profundidad del sistema de retención, en m.
- $q_s$  sobrecarga en la superficie del terreno, en kPa.
- $c_u$  resistencia al corte no-drenada media lo largo de la superficie de falla, en kPa.
- $N_c$  factor de capacidad de carga = 5.14.
- $i_c$  factor de profundidad =  $1 + 0.2 (H' / D)$ .
- $\eta$  factor de adherencia lumbreira-suelo  $0.4 \sqrt{(\sigma'_z / c_u)}$ .
- $\sigma'_z$  presión vertical efectiva debida al peso del suelo a la profundidad media del sistema de retención  $(H/2)$ , en kPa.
- $h_l$  altura del fluido estabilizador, en m.
- $\gamma_l$  peso volumétrico del fluido estabilizador, en  $\text{kN/m}^3$ .
- $\gamma$  peso volumétrico del suelo, en  $\text{kN/m}^3$ .
- $s_c$  factor de forma de acuerdo con la tabla, adimensional.
- $J$  relación de superficies definida en la tabla 4.1, adimensional.

Tabla 4.1. Factores para la revisión de la falla de fondo por cortante.

Forma de sección transversal de la lumbrera	$S_c$	$J$
Rectangular	$1 + 0.2 \frac{D}{L}$	$2d + \left(\frac{1}{L} + \frac{1}{D}\right)$
Cuadrada	1.2	$4 \frac{d}{D}$
Circular	1.5	

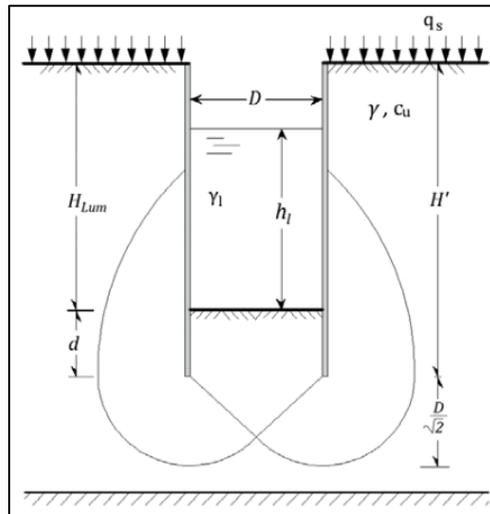


Imagen 4.5. Esquema de parámetros a considerar en la estabilidad del fondo por cortante.

#### 4.4 Estabilidad del fondo por sub-presión

La falla por sub-presión se genera debido a la presión hidrostática que actúa verticalmente en el estrato permeable ubicado en la parte inferior de la excavación (Aguilar et al, 2019), ocasionando el levantamiento del fondo de ésta, gracias a la pérdida de equilibrio en el sistema representado por la pérdida del empuje pasivo al que está sometido el empotramiento de la pantalla perimetral (Acevedo y Aguilar, 2019); este análisis considera la posición del nivel freático y la profundidad del estrato permeable (Aguilar et al, 2019), además del peso del bloque de suelo bajo el fondo de la excavación hasta el estrato permeable y la fuerza resistente generada por la fricción que produce el bloque de suelo entre el fondo de la excavación y el estrato permeable (Acevedo y Aguilar, 2019).

En la imagen 4.6 se muestra un esquema donde se especifican los parámetros a considerar para verificar la seguridad de una lumbrera contra este tipo de falla, el factor de seguridad mínimo es de 1.5 y se calcula con la siguiente expresión (CFE e Instituto de Ingeniería UNAM, 2018):

$$FS = \frac{H_{lum}\gamma_l + \gamma h_s + \eta c_u J}{u}$$

donde

$H_{lum}$  profundidad al fondo de la excavación, en m.

$\gamma_l$  peso volumétrico del fluido estabilizador, en kN/m<sup>3</sup>.

$\gamma$  peso volumétrico del suelo del fondo de la excavación, en kN/m<sup>3</sup>.

$h_s$  altura del suelo impermeable, en m. (altura del fondo de la excavación a la capa permeable).

$\eta$  factor de adherencia lumbrera-suelo  $0.4\sqrt{(\sigma'_z / c_u)}$ .

$\sigma'_z$  presión vertical efectiva debida al peso del suelo a la profundidad media del sistema de retención  $(H_{lum} + d/2)$ , en kPa. Si  $h_s < d$  entonces  $d$  se reemplaza por  $h_s$ .

$H'$  profundidad del sistema de retención, en m.

$u$  presión de poro en el lecho inferior de la capa impermeable, en kPa.

$J$  relación de superficies definida en la tabla 4.1, empleando  $d = H'$ .

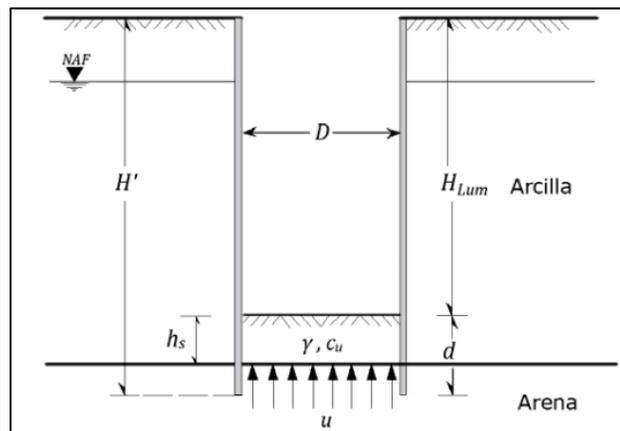


Imagen 4.6. Esquema de parámetros a considerar en la estabilidad por sub-presión.

#### 4.5 Estabilidad por flotación

La presencia del nivel de aguas freáticas cercano a la superficie del terreno puede generar la falla por flotación de la estructura de la lumbrera una vez terminada, es decir, después de retirar el fluido estabilizador de la excavación, o también al interrumpir el bombeo profundo empleado para evitar la falla de fondo por sub-presión (CFE e Instituto de Ingeniería UNAM, 2018).

Este tipo de falla se origina debido al principio de Arquímedes, pues al estar la estructura de la lumbrera parcialmente sumergida en el agua subterránea, ésta intenta empujarla hacia arriba con un empuje igual al peso del agua desplazada.

En la imagen 4.7 se muestra un esquema donde se especifican los parámetros a considerar para verificar la seguridad de una lumbrera contra este tipo de falla, el factor de seguridad mínimo es de 1.5 y se calcula como (CFE e Instituto de Ingeniería UNAM, 2018):

$$FS = \frac{\frac{W_e}{A_T} + fJ}{\gamma_w h_w}$$

donde:

$W_e$  peso de la estructura de la lumbreira, en kN.

$A_T$  área transversal del fondo de la lumbreira, en m<sup>2</sup>.

$f$  adherencia lumbreira-suelo, en kPa.

$$f = c_u \eta \quad \text{para suelos blandos (kPa).}$$

$$f = \sigma'_z K_0 \tan \phi_L \quad \text{para suelos friccionantes (kPa).}$$

$c_u$  resistencia al corte no-drenada media del suelo a lo largo del fuste de la lumbreira, en kPa.

$H$  factor de adherencia lumbreira-suelo, adimensional;  $\eta = 0.4\sqrt{(\sigma'_z / c_u)}$

$\sigma'_z$  presión vertical efectiva debida al peso del suelo a la profundidad media del sistema de retención ( $H' / 2$ ), en kPa.

$K_0$  coeficiente de presión de tierras en reposo  $= 1 - \text{sen } \phi'$ , adimensional.

$\phi_L$  fricción lumbreira-suelo en función de  $\phi'$ , valor típico de  $(3/4) \phi'$ , en grados.

$\phi'$  ángulo de fricción medio efectivo del suelo a lo largo del fuste de la lumbreira, en grados.

$J$  relación de superficies definida en la tabla 4.1, empleando  $d = H'$ .

$\gamma_w$  peso volumétrico del agua, en kN/m<sup>3</sup>.

$H_w$  altura del agua respecto al fondo de la lumbreira, en m.

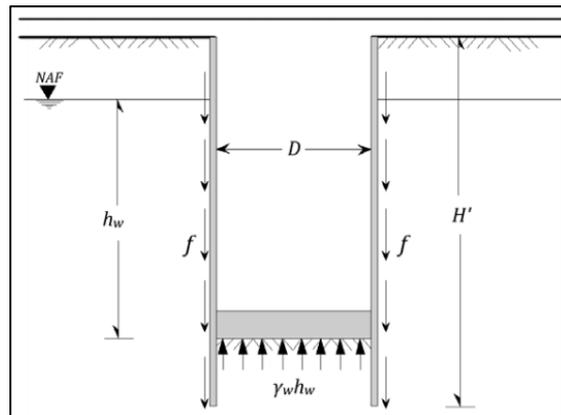


Imagen 4.7. Esquema de parámetros a considerar en la estabilidad por flotación.

#### 4.6 Estabilidad por extrusión

La falla por extrusión sucede cuando una capa o un lente formado por material cohesivo de muy baja resistencia en comparación con los estratos que lo rodean pierde confinamiento al realizarse la excavación, en suelos finos muy blandos, cuando las juntas entre los paneles

de muro Milán quedan abiertas, es posible que se desarrolle este tipo de falla a través de dichas juntas (CFE e Instituto de Ingeniería UNAM, 2018); también se puede presentar cuando concluye la construcción de la lumbrera y se procede a realizar el portal de conexión con el túnel.

El factor de seguridad contra inestabilidad del suelo por extrusión debe ser mínimo de 1.2 y se calcula a la profundidad de la capa o lente débil,  $z$ , (CFE e Instituto de Ingeniería UNAM, 2018):

$$FS = \frac{2c_u}{(\gamma z + q_s)}$$

donde

- $c_u$  resistencia al corte no-drenada a la profundidad de interés, en kPa.
- $\gamma$  peso volumétrico del suelo, en  $\text{kN/m}^3$ .
- $z$  profundidad del depósito de suelo, en m.
- $q_s$  sobrecarga en la superficie del terreno, en kPa.

## 5 RESULTADOS

De acuerdo con el modelo geotécnico propuesto se realizaron los análisis para asegurar la estabilidad de la lumbrera.

Las dimensiones de la estructura consideradas son la profundidad de la excavación ( $H_{lum}$ ) de 26.6 metros, longitud de pantalla ( $L$ ) de 5.4 metros, diámetro de la lumbrera ( $D$ ) de 18.2 metros, profundidad de empotre del muro pantalla ( $d$ ) de un metro. Además, se consideró un peso volumétrico de lodo bentonítico de  $10.5 \text{ kN/m}^3$  y una sobrecarga de  $15 \text{ kPa}$  de carga viva.

### 5.1 Estabilidad de las paredes con el criterio Noruego

Para este análisis se consideró la resistencia al corte y peso volumétrico ponderados de las unidades geotécnicas que se encuentran de la superficie al nivel de desplante del muro pantalla, estos valores resultaron de  $29.63 \text{ kPa}$  y  $11.68 \text{ kN/m}^3$  respectivamente.

Para garantizar que la excavación de la zanja sea estable se consideró una profundidad del lodo bentonítico de 0.5 metros, lo cual se puede apreciar en el gráfico factor de seguridad contra profundidad de excavación (imagen 5.1), donde la línea en color naranja es el factor de seguridad mínimo que puede tener este análisis, y la curva en color azul es la variación del factor de seguridad conforme aumenta la profundidad de excavación, la cual rebasa en todo momento el mínimo permisible.

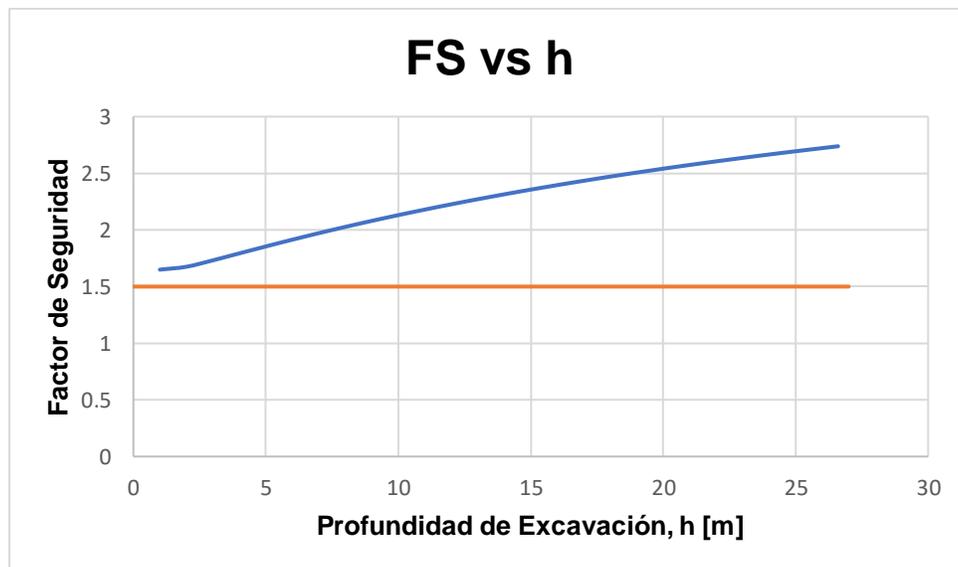


Imagen 5.1. Gráfico factor de seguridad contra profundidad de excavación para estabilidad de zanja.

En la imagen 5.2 se observa el gráfico factor de seguridad contra profundidad del lodo bentonítico, la curva muestra la variación del factor al aumentar la profundidad del lodo una

vez que se ha alcanzado el nivel de desplante del muro pantalla, e indica que la profundidad máxima que puede tener el lodo es de 3.6 metros, al aumentarla el factor de seguridad estaría por debajo del permisible.

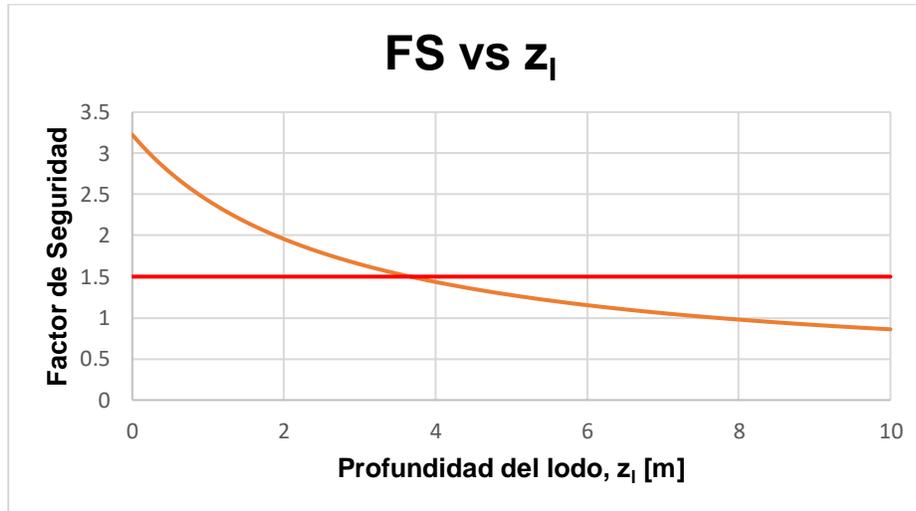


Imagen 5.2. Gráfico factor de seguridad contra profundidad del lodo para estabilidad de zanja.

## 5.2 Estabilidad del núcleo

Para este análisis se consideró la resistencia al corte y peso volumétrico ponderados de las unidades geotécnicas que se encuentran de la superficie al nivel máximo de excavación, estos valores resultaron de 29.63 kPa y 11.68 kN/m<sup>3</sup> respectivamente.

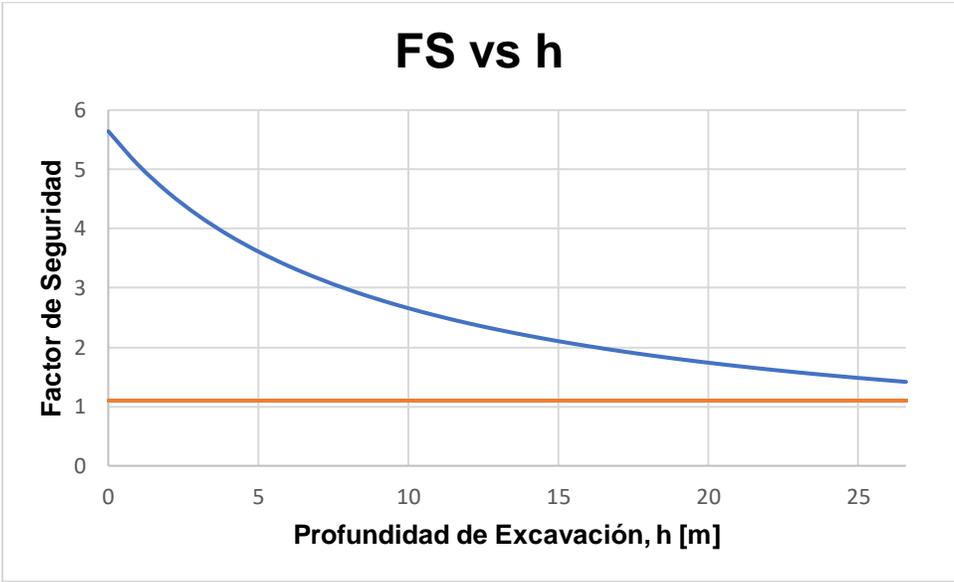
Para garantizar que la excavación del núcleo sea estable se consideró una profundidad del lodo bentonítico de un metro, lo cual se puede apreciar en el gráfico factor de seguridad contra profundidad de excavación (imagen 5.3), donde la línea en color naranja es el factor de seguridad mínimo que puede tener este análisis, y la curva en color azul es la variación del factor de seguridad conforme aumenta la profundidad de excavación, la cual rebasa en todo momento el mínimo permisible.

En la imagen 5.4 se observa el gráfico factor de seguridad contra profundidad del lodo estabilizador, el cual muestra la profundidad máxima que puede alcanzar el lodo cuando se ha llegado al nivel máximo de excavación, siendo este de dos metros; al aumentar esta profundidad el factor de seguridad disminuye por debajo del valor permisible.

## 5.3 Estabilidad del fondo por cortante

Para este análisis se consideró la resistencia al corte y peso volumétrico ponderados de las unidades geotécnicas que se encuentran de la superficie a la profundidad máxima de falla, dichos valores resultaron de 29.63 kPa y 11.68 kN/m<sup>3</sup> respectivamente.

De acuerdo al gráfico factor de seguridad contra altura del lodo (imagen 5.5), se observa que a mayor altura mayor factor, siendo 12.5 metros la altura mínima que garantiza la estabilidad ante una posible falla.



5.3. Gráfico factor de seguridad contra profundidad de excavación para estabilidad del núcleo.

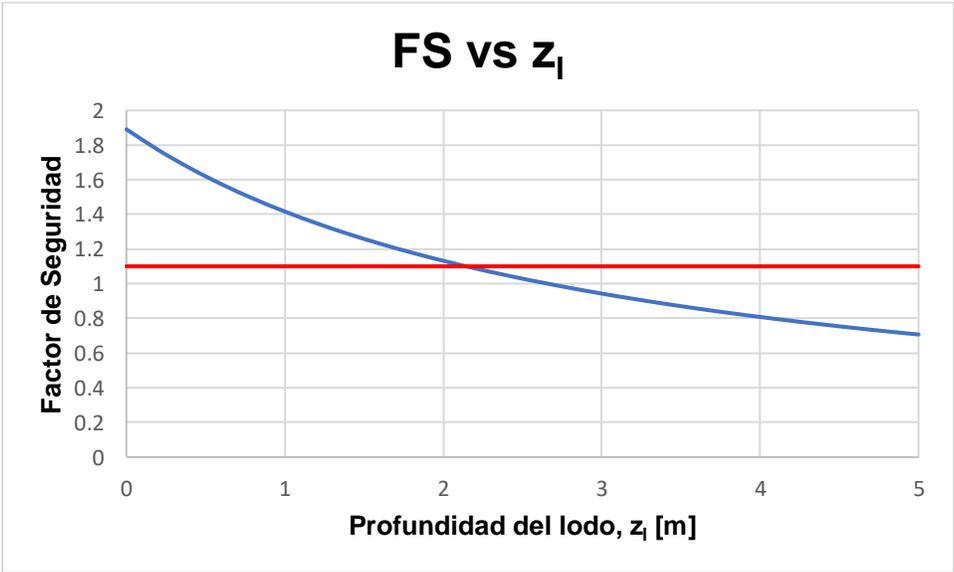


Imagen 5.4. Gráfico factor de seguridad contra profundidad del lodo para estabilidad del núcleo.

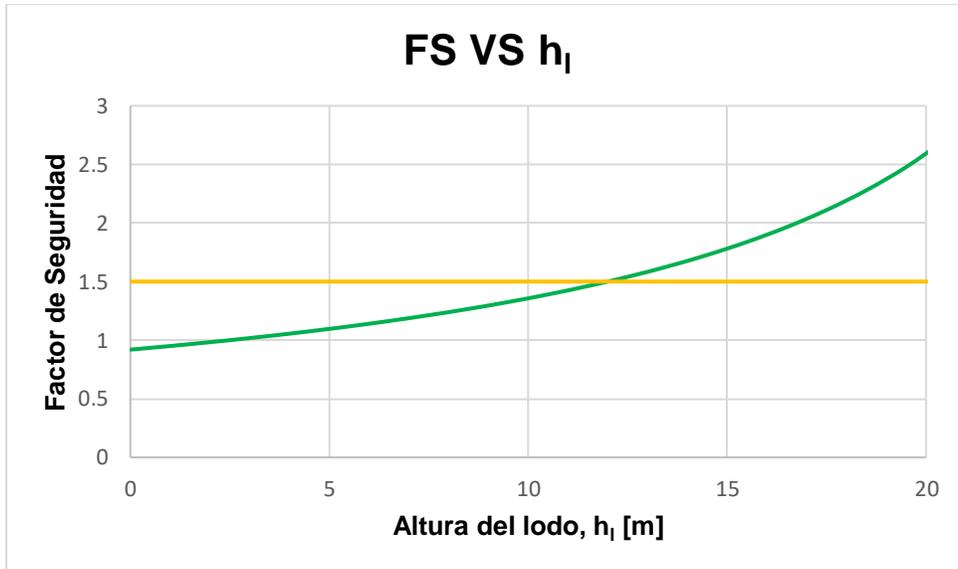


Imagen 5.5. Gráfico factor de seguridad contra altura del lodo.

#### 5.4 Estabilidad del fondo por sub-presión

Para este análisis se consideró la resistencia al corte y el peso volumétrico de la unidad geotécnica que se encuentra entre el nivel máximo de excavación y la capa dura permeable, valores que resultaron de 41.46 kPa y 11.53 kN/m<sup>3</sup> respectivamente.

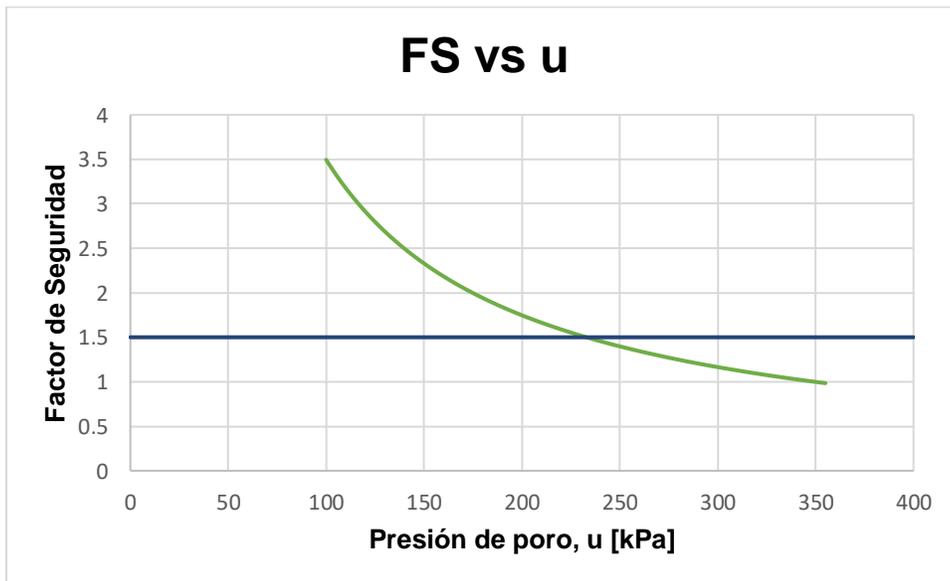


Imagen 5.6. Gráfico factor de seguridad contra presión de poro.

En la imagen 5.6 se muestra el gráfico factor de seguridad contra presión de poro, en él se observa que por arriba de los 230 kPa el factor tiene valores inferiores al mínimo permisible. Considerando que la presión de poro en la capa dura es de 320 kPa, será necesario abatir la presión hasta 230 kPa para evitar inestabilidad.

### 5.5 Estabilidad por flotación

Considerando que el peso volumétrico del concreto estructural es de 23.54 kN/m<sup>3</sup>, del mortero de cemento y arena 20.60 kN/m<sup>3</sup>, y el peso del tanque de flotación de 68.67 kN; se realizó el cálculo del peso total de la estructura para así determinar si las dimensiones propuestas en el esquema de construcción cumplen con el factor de seguridad mínimo requerido para evitar la falla por flotación.

El peso de la estructura debe ser mínimo de 87.81 MN para que el factor de seguridad sea mayor a 1.5, en la tabla 5.1 se muestran los pesos obtenidos de cada una de las partes de la estructura, sin considerar la tapa de la lumbrera, obteniendo un total de 56.18 MN, así que para garantizar la estabilidad el peso de la tapa debe ser mínimo de 31.64 MN.

Tabla 5.1. Pesos de las partes de la estructura.

Parte de la estructura	Peso kN
Losa de mortero	18758.11
Fuste de mortero	13231.02
Losa de concreto	8205.75
Fuste de concreto	15912.68
Tanque de flotación	68.67
<b>TOTAL</b>	<b>56176.23</b>

### 5.6 Estabilidad por extrusión

Este análisis se realizó en la conexión de la lumbrera con el túnel, se consideró la resistencia al corte y el peso volumétrico de las unidades geotécnicas que se encuentran de la superficie a la base del túnel, dichos valores resultaron de 25.10 kPa y 11.73 kN/m<sup>3</sup> respectivamente, y la profundidad de lente débil es de 20.4 metros

El factor de seguridad obtenido es de 0.20, lo que significa que el suelo necesita un mejoramiento que alcance mínimo 155 kPa para que sea estable ante esta condición.

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De acuerdo con la caracterización del sitio y a los resultados obtenidos de los análisis de estabilidad se emiten las siguientes conclusiones y recomendaciones:

- El sitio de estudio se ubica en la Zona de Lago del Valle de México, y a decir por los resultados de CPTu y SPT, corresponde a la estratigrafía típica de esta zona. La CS tiene un espesor de 0.5 metros, la FAS un espesor de 32 metros, la CD un espesor de 1.5 metros, la FAI un espesor de 15 metros y los DP un espesor de 8 metros, considerando que la CD y los DP son estratos drenantes; esta información es fundamental para los análisis de estabilidad de la Lumbrera Flotada.
- El sitio tiene un NAF de 0.5 metros al momento de la ejecución de la exploración geotécnica y la piezometría es hidrostática hasta la CD (34 metros), y se abate a mayor profundidad alcanzando el 66.33% de abatimiento hasta la profundidad máxima de exploración del CPTu.
- Con base en los resultados de exploración geotécnica con SPT, VST, CPTu y los resultados de ensayos de laboratorio, se definió el modelo geotécnico para obtener los parámetros requeridos en los análisis de estabilidad, como se indica en el capítulo 3.
- Para garantizar la estabilidad de la lumbrera flotada durante su proceso constructivo, se realizaron análisis de estabilidad con métodos analíticos de tal manera que se cumpliera con los factores de seguridad mínimos de cada uno de los análisis realizados, estos son estabilidad de zanja, núcleo, del fondo por cortante, del fondo por sub-presión, por flotación y por extrusión como se muestra en el capítulo 5.
- Durante la excavación de la zanja, se requiere mantener una profundidad del lodo bentonítico en todo momento de máximos 0.5 metros para garantizar la estabilidad durante este proceso, una vez que se llega al nivel del desplante del muro pantalla se recomienda evitar disminuir la profundidad del lodo por arriba de los 3.6 metros.
- En cuanto a la estabilidad del núcleo, durante su excavación se debe mantener una profundidad máxima del lodo estabilizador de 1.0 m; una vez que se llega al nivel máximo de excavación es recomendable evitar disminuir la profundidad del lodo por debajo de los 2 m.
- Para evitar inestabilidad del fondo por cortante se requiere conservar una altura del lodo mínima de 12.5 metros.
- En el caso de la falla del fondo por sub-presión, se debe considerar que la presión de poro en la capa permeable (Capa Dura) es de 320 kPa y para garantizar la estabilidad se recomienda abatirla mediante bombeo a mínimo 230 kPa.
- Para evitar la inestabilidad por flotación, la estructura de la lumbrera requiere tener un peso mínimo de 87.81 MN, para ello se deben asegurar las dimensiones

establecidas en el esquema de construcción y los pesos volumétricos requeridos del mortero y el concreto.

- Finalmente, para mantener la estabilidad ante posibles efectos de extrusión, se recomienda un mejoramiento del suelo en las conexiones de la lumbrera con el túnel, dicho material mejorado debe de alcanzar una resistencia al corte mínima de 155 kPa.

## BIBLIOGRAFÍA

- a) Acevedo, M., y Aguilar, M. 2019. "Criterios de diseño para determinar factores de seguridad en lumbreras construidas con el procedimiento constructivo de lumbreras flotadas en suelos blandos". Geotechnical Engineering in the XXI Century: Lessons learned of the XVI Pan.American conferences on soils mechanics and geotechnical engineering (XVI PCSMGE), 17-20 november 2019, Cancún, Mexico. México.
- b) Aguilar, M., Acevedo, M. y Schmitter, J. 2019. "Experiencias en el diseño y construcción de lumbreras, flotadas y con muros Milán, en suelos blandos". Revista Geotecnia SMIG No. 251. pp. 16.
- c) American Society for Testing and Materials (ASTM). 1994. "D 2573 Standard Test Method for Field Vane Shear Test in Cohesive Soil". American Society for Testing and Materials (ASTM).
- d) Asociación Mexicana de Ingeniería de Túneles y Obras Subterráneas, A.C. (AMITOS). 2018. "La entrevista: José Lorenzo Cravioto Ortiz". Revista Obras Subterráneas No. 21. pp. 4. <https://issuu.com/amitos/docs/os21>
- e) Ciudad de México. 2017. Gaceta Oficial de la Ciudad de México. Ciudad de México. pp. 10. <https://www.smig.org.mx/archivos/NTC2017/normas-tecnicas-complementarias-reglamento-construcciones-cdmx-2017.pdf>
- f) Comisión de Vialidad y Transporte Urbano (COVITUR). 1987. "Manual de diseño geotécnico". Departamento del Distrito Federal y la Secretaría General de Obras. México, D.F.
- g) Comisión Federal de Electricidad (CFE) e Instituto de Ingeniería de la UNAM. 2018. "Manual de Diseño de Obras Civiles Cap. B.5.1 Túneles y Lumbreras en Suelos: Sección B: Geotecnia Tema 5: Tuneles y Lumbreras". Comisión Federal de Electricidad. México, D.F.
- h) Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2007. Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento; Geotecnia en construcción especializada". Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México.
- i) Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica/Secretaría General de Obras/DDF. 1991. "Análisis y procedimientos constructivos de lumbreras del Sistema de Drenaje Profundo de la Ciudad de México." Ingeniería Hidráulica en México. México. pp. 58 – 67.
- j) Escamilla, I. y Santos, C. 2012. "La zona metropolitana del Valle de México: Transformación urbano-rural de la región centro de México". XII Coloquio Internacional de Geocrítica, las independencias y construcción de estados nacionales: poder, territorialización y socialización , siglo XIX-XX.

- k) Geotecnia Online. 2020. "Arcilla sensible". Diccionario Geotecnia Online. <https://www.diccionario.geotecnia.online/palabra/arcilla-sensible/>
- l) Guerrero, R. 2017. "Cimentaciones Mexicanas S.A. de C.V. (reporte final de práctica profesional)". Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Unidad Zacatenco. Ciudad de México.
- m) Gutiérrez, L. 2018. "Procedimiento de excavación de tableros de muro Millán que conforman la lumbrera L-3A del Túnel Emisor Oriente". Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica. México.
- n) Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. 2014. "Revisión y Evaluación en Geotecnia y Estructuras para Resolver la Problemática del Transporte Aéreo en el Centro del País, Convenio de Colaboración No. ASA-UNAM-13-002, Primer Informe Parcial". Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. México.
- o) Jiménez, F. 2018. "Sistemas contención para excavaciones en suelos blandos del Valle de México (tesis de maestría)". Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería. Ciudad de México.
- p) Jiménez, G. 2003. "Procedimiento constructivo de lumbreras por el método de flotación (tesis de licenciatura)". Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Unidad Zacatenco. Ciudad de México.
- q) Murillo, R. 2015. "Comportamiento del suelo y obras en el ex Lago de Texcoco". Revista Geotecnia SMIG No. 238. México. pp. 20.
- r) Murillo, R. 2017. "Excavaciones del sistema hidráulico en el Lago de Texcoco". Revista Geotecnia SMIG No. 245. pp. 14. México.
- s) Robertson, P. y Cabal, K. 2014. "Guide to cone penetration testing for geotechnical engineering". Gregg Drilling & Testing, Inc. Signal Hill, California.
- t) Rodríguez, M. 2010. "Caracterización geoestadística del subsuelo del ex Lago de Texcoco (tesis de maestría)". Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Unidad Zacatenco. Ciudad de México.
- u) Saucedo, A. 2018. "Justificación y proceso constructivo de lumbrera 3-A por medio de muro Millán en el cad 6 + 487.963 del Túnel Emisor Oriente (tesis de licenciatura)". Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Unidad Zacatenco. Ciudad de México.
- v) Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, A.C. 2002. "Manual de construcción geotécnica, Tomo 1". Editorial Copyright. Ciudad de México.

- w) Tenorio, A. 2009. "Caracterización geotécnica del subsuelo del centro histórico de la Ciudad de México (tesis de licenciatura)". Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Unidad Zacatenco. Ciudad de México.
- x) Zemva, S. 2011. "Diseño y construcción de lumbreras en suelos blandos por el procedimiento de los anillos prefabricados (tesis de maestría)". Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería. Ciudad de México.
- y) ZINZANJA, S.A. de C.V. Ingeniería subterránea avanzada. 2013. "Procedimientos constructivos". ZINZANJA, S.A. de C.V. Ingeniería subterránea avanzada. <http://www.zinzanja.com/Procedimientos.html>