



**UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE MÉXICO**



FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES DE INGENIERÍA

CAMPO DE CONOCIMIENTO: INGENIERÍA CIVIL

**EXCAVACIÓN CIRCULAR AUTOESTABLE A 46 M DE PROFUNDIDAD  
EN LA ZONA LAGO DE LA CDMX PARA UN PROYECTO  
INMOBILIARIO**

**T E S I N A**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

**ESPECIALISTA EN CONSTRUCCIÓN**

PRESENTA:

**ING. ROBERTO ELIGIO ORTEGA GARCÍA**

DIRECTOR DE TESINA: **M. I. JUAN PAULÍN AGUIRRE**

CIUDAD UNIVERSITARIA, CIUDAD DE MÉXICO

ENERO 2019

## AGRADECIMIENTOS Y DEDICATORIAS

*A la Universidad Nacional Autónoma de México por darme la oportunidad de continuar preparándome y ampliar mis conocimientos.*

*A la Facultad de Ingeniería y a toda la plantilla de profesores de la Especialización en Construcción por capacitarme a lo largo del Posgrado.*

*Al Director de esta Tesina, M. I. Juan Paulín Aguirre, que estuvo pendiente en todo momento en el que requerí orientación, que me brindó todas las atenciones y mostró el mayor interés en dirigir este trabajo. Al grupo Soletanche Bachy y a la empresa CIMESA por las facilidades otorgadas durante su realización, particularmente a los Ingenieros: Jaime de la Rosa, Salvador Martínez y Guillaume Pelletier.*

*A mi padre Florentino Ortega Jaramillo y a mi madre Jacinta García González, por todos los sacrificios que han hecho para sacarnos adelante, por su apoyo incondicional y sus innumerables consejos en cada una de las etapas de nuestras vidas.*

*A mis hermanos por cada una de sus enseñanzas.*

*A mi esposa Fernanda García Barrera, quien ha sido mi fortaleza durante esta nueva etapa de vida.*

## AGRADECIMIENTOS ESPECIALES

*Geotécnicamente University Tower es un proyecto atípico, ubicado en la zona de lago del valle de México con espesores importantes de arcillas blandas, es la primera vez que una excavación circular, autoestable, a poco menos de 50 m de profundidad se resuelve con un muro Milán estructural preexistente a la excavación para un proyecto urbano de edificación. La experiencia gana valor si se comparte para poder seguir generando conocimiento, por esta razón reconocemos y agradecemos a Desarrolladora del Parque, en particular al Arq. Enrique Macotela, por autorizar el publicar datos del proyecto y por darnos el apoyo necesario para que este trabajo sea posible.*

# CONTENIDO.

<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>5</b>
PROPÓSITO. ....	9
ALCANCE. ....	9
<b>CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES. ....</b>	<b>11</b>
1.1 Localización.....	11
1.2 Descripción del proyecto. ....	11
1.3 Referencias o colindancias.....	12
1.4 Objetivo.....	13
<b>CAPÍTULO 2. TRABAJOS DE EXPLORACIÓN DEL SUBSUELO Y ENSAYES DE LABORATORIO.....</b>	<b>14</b>
2.1 Importancia de la exploración del subsuelo.....	14
2.2 Zonificación geotécnica en la ubicación del proyecto. ....	15
2.3 Estudios preliminares.....	17
2.4 Trabajos de exploración geotécnica. ....	19
2.5 Trabajos de laboratorio. ....	20
2.6 Estratigrafía de diseño. ....	21
<b>CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE EXCAVACIONES.....</b>	<b>28</b>
3.1 Métodos de excavación. ....	37
3.1.1 Método de excavación en Top-Down. ....	38
3.1.2 Método de excavación con anclas. ....	41
3.2 Factores que influyen en la selección del método de excavación. ....	47
3.3 Estabilización de una excavación circular.....	48
3.4 Análisis de muro Milán estructural circular.....	51
3.4.1 Análisis del muro Milán con Programa PARIS. ....	56
3.4.2 Diseño del muro Milán. ....	72

<b>CAPÍTULO 4. PROCESO CONSTRUCTIVO.....</b>	<b>78</b>
4.1 Planeación y logística de ejecución. ....	78
4.2 Maquinaria y equipos. ....	80
4.3 Materiales. ....	93
4.4 Construcción de muro Milán estructural circular.....	94
4.5 Excavación del núcleo hasta el Nivel Máximo de Excavación. ....	128
4.6 Medio Ambiente. ....	129
4.7 Seguridad. ....	133
<b>CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES.....</b>	<b>139</b>
<b>ANEXOS. ....</b>	<b>140</b>
<b>REFERENCIAS. ....</b>	<b>143</b>

# INTRODUCCIÓN.

Hoy en día, la infraestructura es fundamental para una sociedad en constante desarrollo. Ejemplo de ello son las edificaciones e inmuebles verticales que podemos ver a diario, muchos de los cuales son de gran altura y que requieren de métodos constructivos especiales y más sofisticados para ejecutarlos. En el valle de México, a pesar de su extenso territorio, hemos llegado a niveles de sobrepoblación y falta de espacio; por lo que el crecimiento horizontal que se ha llevado a cabo desde la modernización de la ciudad debe suspenderse, y por el contrario, debemos seguir el modelo de crecimiento vertical que se ha desarrollado en los últimos años. Dicho crecimiento implica superestructuras con grandes cargas a transmitir al suelo en superficies reducidas, lo cual obliga a buscar estratos de suelo cada vez más resistentes que se encuentran a profundidades de más de 40 m. Cabe recordar que el valle de México albergó por siglos al Lago de Texcoco y por diferentes motivos (principalmente los asentamientos humanos y sobre explotación del Lago) este se secó; dejando a la Ciudad inhabilitada de un recurso valioso, con grandes problemas mecánicos de suelo y con un hundimiento regional que año con año aumenta por la constante extracción de agua a nivel subterráneo. Este hundimiento se ha registrado en el orden de 10 m en 60 años.

Para llevar a cabo este tipo de obras de infraestructura vertical, se requiere la ejecución de excavaciones. Puede tratarse de operaciones relativamente simples, como en el caso de zanjas con el fin de alojar zapatas para la cimentación de una edificación, o tuberías de conducción de agua o drenaje para una población, pero cuando se trata de obras muy importantes, la excavación resulta en general más delicada, sobre todo cuando se combinan condiciones de gran profundidad con la presencia de suelos inestables, como es el caso del valle de México. Realizar este tipo de excavaciones por métodos tradicionales puede, en muchos casos, no ser posible o resultar excesivamente costoso.

Una excavación es el procedimiento constructivo que consiste en la extracción de suelo y/o roca, de modo que su función principal es preparar el terreno para la construcción del sistema de cimentación de una estructura. El proceso constructivo y método de excavación son elegidos de acuerdo a las propiedades del suelo, identificándose todas y cada una de las necesidades de la obra civil durante los estudios previos.

Dentro del campo de la Ingeniería Civil, prácticamente toda obra inmobiliaria comienza haciendo una excavación, ya sea para alojar su cimentación y/o pisos que funcionen como estacionamiento. Una obra puede realizarse sin interferencias

con instalaciones aéreas, subterráneas o estructuras vecinas; sin embargo, cuando lo anterior no es posible, es necesario contener las paredes de la excavación para no afectar la estabilidad de las estructuras e instalaciones vecinas, así como la protección y seguridad de los trabajadores que albergan dentro de la obra. De esta manera, previo al inicio de los procesos constructivos, se tiene la necesidad de emplear la geotecnia como campo de estudio.

Uno de los aspectos más importantes a considerar durante una excavación, son los sistemas de contención que se basan en el hecho de que el suelo transmite cargas laterales, por este motivo un sistema de este tipo servirá para contener al terreno y sus fuerzas de empuje. El dimensionamiento de estos elementos se basa en el cálculo de la magnitud y distribución de los empujes ejercidos por el suelo.

Los suelos en los que se excava y se construye un sistema de contención, no tienen una resistencia en términos constructivos “trabajable”, debido a los esfuerzos de tensión, por lo que es necesario reforzarlos para mejorar su comportamiento. Con base en esto y por recomendaciones del diseño geotécnico, se puede optar por utilizar un sistema de refuerzo en el suelo.

Terzaghi y Peck (1967) nos hacen la recomendación que antes de proyectar en forma adecuada cualquier diseño de excavación, es necesario hacer una distinción entre aquellas que son excavaciones someras; de una profundidad menor de cinco metros, y excavaciones profundas; las que son de una profundidad mayor. Peck et al. (1977), nos menciona que cuando la profundidad de la excavación es mayor que cinco o seis metros, el uso de tablestacas de retención se vuelve muy costoso, es así que otros métodos para estabilizar son utilizados. Otra cuestión que se debe de revisar antes de empezar a diseñar es la geometría de la excavación. Con ello seleccionar el procedimiento de ejecución más adecuado. Actualmente las técnicas de retención y estabilidad han mejorado notablemente tanto en cuestiones constructivas como económicas. El *muro diafragma* o mejor conocido como *muro Milán* se utiliza como un método de retención durante la excavación. Tiene la función principal de servir como estructura definitiva de la edificación, además de proteger a los inmuebles colindantes y vecinos.

Ou (2006) recomienda analizar el proyecto antes de hacer el diseño de una excavación profunda. Se revisa como un problema de interacción suelo-estructura de la mecánica de suelos. Algunas de las propiedades del suelo son que este es un material no lineal, inelástico y anisótropo, el cual, su comportamiento tiende a ser afectado por la presencia de fluidos. Es así que para analizar el suelo, es necesario hacer simulaciones elastoplásticas del comportamiento del suelo, ver qué es lo que sucede entre los muros de retención y el suelo durante el procedimiento de excavación.

El diseño y construcción requiere conocer características como la topografía del sitio donde se va a realizar la obra, las condiciones del subsuelo, las condiciones del nivel freático, el riesgo sísmico, cargas no previstas, la protección de servicios públicos y edificaciones aledañas.

Normalmente las fallas en las excavaciones profundas no ocurren meramente por colapso estructural, existen otros tipos de falla que incluyen la deformación excesiva del suelo, inadecuado abatimiento del nivel freático, insuficiente durabilidad del soporte de la estructura resistente en el tiempo, etc.

Puller (1996) nos enlista con base en su experiencia las causas más usuales de los accidentes en las excavaciones.

*En excavaciones a cielo abierto:*

- Inadecuada investigación de sitio resultado de suposiciones optimistas en la homogeneidad del suelo y de la roca, la fuerza del suelo y las condiciones del nivel del agua.
- Apreciación inadecuada del ingeniero calculista del posible asentamiento de las estructuras adyacentes y servicios públicos.
- Falta de criterio del ingeniero diseñador y del constructor sobre los efectos del agua y en la resistencia del suelo.

*En excavaciones adermadas:*

- Inadecuada investigación de sitio resultado de suposiciones optimistas en la homogeneidad del suelo y de la roca, la fuerza del suelo y las condiciones del nivel del agua.
- Inadecuada calidad del detalle estructural.
- Falta de coordinación entre el diseñador y el constructor.
- Falta de apreciación por parte del diseñador sobre las limitaciones de las técnicas del especialista como los muros diafragma y de las anclas.
- Falta de valoración por parte del diseñador en la influencia de las deflexiones en el soporte de la estructura del suelo y de las deformaciones del suelo retenido.
- Cambios en las cargas de las condiciones naturales, del nivel freático, mareas, olas, temperaturas y la falta de conciencia del constructor de las consecuencias debido a estos cambios.
- Cambios en las condiciones del suelo y de las rocas y falta del criterio del constructor por sus consecuencias.
- La sobrecarga sobre la estructura del suelo por plantas de cargas temporales. Trabajadores sin experiencia.



A pesar de la cantidad de información que existe acerca de excavaciones profundas, no existe una guía o un documento que archive toda la información que sirva para normalizar un procedimiento de diseño el cual sea válido en el mundo. En algunas ocasiones cuando se realiza una excavación en suelo con baja permeabilidad, se utiliza bombeo previo con el fin de abatir el nivel de aguas freáticas, sin embargo, esta estrategia no es necesariamente la más adecuada en la práctica, como ha sido corroborado por la experiencia de algunos ingenieros. A mediados del siglo pasado, Juárez Badillo y Rico Rodríguez (1955) observaron que, en una excavación en suelo blando, el nivel de aguas freáticas se abate instantáneamente según avanza la misma. Esta observación indica que en determinados casos la forma tradicional para diseñar el bombeo conlleva a instalar sistemas innecesarios.

El diseño completo de una excavación profunda incluye aspectos como: abatimiento del nivel freático, sistema de bombeo, sistema de retención, sistema de apuntalamiento, estabilidad de las paredes y del fondo, procedimiento de excavación, sistema de monitoreo, protección de los edificios, expansión del fondo en suelos blandos, posibilidad de tubificación, etc.

En todos los casos se efectuarán nivelaciones fijando referencias y testigos. Además, al efectuar la excavación, se tomarán las precauciones necesarias para evitar movimientos que comprometan la seguridad de las estructuras vecinas, así como el volteo de los cimientos adyacentes. Para tal efecto pueden emplearse procedimientos alternos como son: excavación por zonas, excavación por tramos en las colindancias y apuntalamiento de las paredes.

Tomaremos este proyecto ubicado en la zona de lago de la Ciudad de México, donde se hará una excavación profunda retenida con muro diafragma, a fin de desarrollar y comprender el diseño y la construcción de los elementos que retengan las grandes cargas y los esfuerzos del suelo, cuya finalidad es albergar una torre y 17.5 sótanos para estacionamiento. No se pretende estudiar exhaustivamente todos los conceptos, elementos y tipos de excavaciones; sino el aprendizaje del criterio ingenieril y la correcta aplicación de la ingeniería geotécnica-constructiva, son las principales actividades a desarrollar.

## **PROPÓSITO.**

El principal propósito de este trabajo es describir las etapas y los procedimientos que se llevan a cabo para realizar una excavación profunda de tipo circular, garantizando la seguridad de las estructuras vecinas y la del inmueble mismo, a pesar de las condiciones adversas presentes en el sitio. La importancia de ello radica básicamente en desarrollar todos los estudios necesarios previos a la ejecución del proyecto; teniendo como resultado un buen diseño, así como el éxito durante su construcción y en cada una de las etapas posteriores.

## **ALCANCE.**

Asesorándome por ingenieros expertos en el tema, el alcance de este trabajo es dar a conocer algunos de los diversos factores que intervienen durante la ejecución de una excavación circular en la zona de lago de la Ciudad de México, ubicada en la Zona III-b, la cual se caracteriza por la presencia de grandes espesores de arcilla blanda con alta compresibilidad y baja resistencia, aplicando para su diseño el coeficiente sísmico  $CS = 0.45$ .

Este trabajo está formado de cinco capítulos estructurados de la siguiente manera:

## **CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES.**

En este capítulo se detallan las características principales del sitio de interés, en donde se llevará a cabo una excavación a 46 m de profundidad, la cual albergará un inmueble de usos mixtos. Como se mencionó anteriormente, en todo proyecto es fundamental conocer las condiciones en las que se encuentra el terreno, ya que mediante esto, el ingeniero puede planear, diseñar y gestionar las diversas soluciones existentes, de entre las cuales debe elegir la más adecuada para la ejecución de dicho proyecto (segura, útil, duradera y económica).

## **CAPÍTULO 2. TRABAJOS DE EXPLORACIÓN DEL SUBSUELO Y ENSAYES DE LABORATORIO.**

Se describe la zonificación geotécnica donde se ubica el proyecto y se explica de forma general la zonificación geotécnica del valle de México. También se exponen los datos más relevantes que arrojó la mecánica de suelos en el sitio de interés, la importancia de cada uno de los trabajos de exploración y muestreo que se llevaron a cabo y la relevancia que tiene la realización de las pruebas de laboratorio.

### **CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE EXCAVACIONES.**

Se identifican diferentes métodos de excavación y los diversos factores que intervienen en la selección del método más adecuado. Por último, se analiza y se realiza el cálculo de la estabilidad de una excavación circular, considerando las dificultades de excavar en arcillas blandas típicas de la Ciudad de México, las cuales son poco competentes y requieren de elementos estructurales capaces de soportar las grandes cargas y los empujes de la masa de suelo.

### **CAPÍTULO 4. PROCESO CONSTRUCTIVO.**

Se expone la planeación, la logística de ejecución implementada, las técnicas de construcción que deben desarrollarse, los materiales, maquinaria y equipos a utilizar, las medidas de seguridad necesarias y las precauciones que deben tenerse con el medio ambiente a fin de realizar los trabajos de campo. Este capítulo contiene la esencia principal del presente trabajo.

### **CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES.**

Se emiten conclusiones y recomendaciones generales que deberán considerarse antes y durante la ejecución del proyecto.

# CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES.

## 1.1 Localización.

Se realizaron los estudios de mecánica de suelos en Av. Paseo de la Reforma 150 esquina con calle Lucerna y Viena, en la Col. Juárez, Delegación Cuauhtémoc en la Ciudad de México, en donde se pretende construir un proyecto inmobiliario para usos mixtos. La ubicación del predio de interés se muestra en la Figura 1.



*Figura 1. Ubicación del predio de interés.*

## 1.2 Descripción del proyecto.

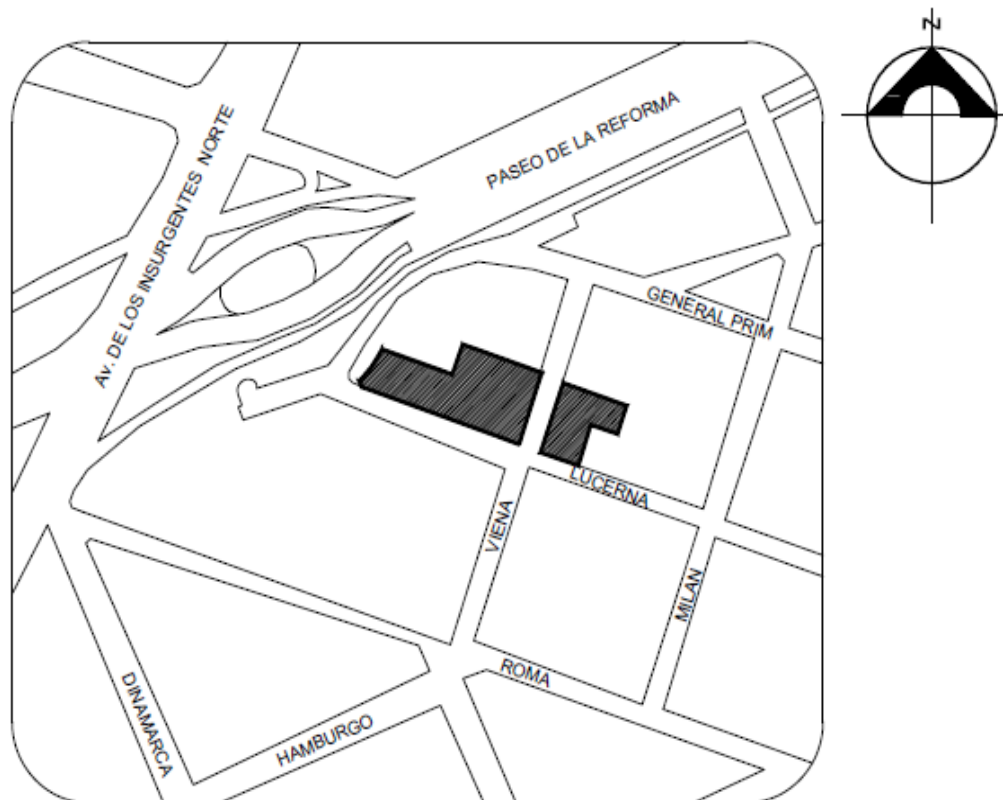
Como en todo proyecto, es fundamental conocer desde el principio hasta el final de la obra, ya que ello nos dará un panorama más amplio de las dimensiones, diseño y el funcionamiento que este tendrá. El proyecto inmobiliario contempla la construcción de un edificio para usos mixtos en la zona de lago de la Ciudad de México.

La propuesta de contención considera una lumbrera de 35.10 m de diámetro interior, retenida por muro Milán con espesor definitivo de 1.00 m hasta una profundidad de 48.10 m y la secuencia de excavación a cielo abierto.

El Nivel de Piso Terminado (N.P.T.) de la losa fondo corresponde con el nivel -45.60 m, sin embargo, considerando la excavación adicional para construcción de losa de fondo se considera un Nivel Máximo de Excavación (N.M.E.) a la -46.65 m.

### 1.3 Referencias o colindancias.

Las referencias para ubicación del sitio de interés son las siguientes: en el lindero Norte con la Calle General Prim, en el lindero Oriente con la Calle Viena, en el lindero Sur con la Calle Lucerna, y finalmente en el lindero Poniente con la Av. Paseo de la Reforma. La zona básicamente está rodeada de vialidades secundarias e inmuebles que van desde los dos hasta los veinte niveles.



**Figura 2.** Croquis de localización del sitio de proyecto.

## **1.4                   Objetivo.**

En este estudio se describirán las especificaciones necesarias para la solución que se juzga más adecuada al proyecto, teniendo como objetivos principales: soportar los empujes del terreno, contener las estructuras vecinas y brindar seguridad a las edificaciones colindantes, así como al inmueble proyectado.

Con objeto de proporcionar un sistema de retención apropiado durante la excavación, y para evitar posibles accidentes que puedan surgir, se llevaron a cabo diversos análisis de mecánica de suelos basados en los resultados de la exploración y muestreo del subsuelo efectuados en el predio de interés.

# **CAPÍTULO 2. TRABAJOS DE EXPLORACIÓN DEL SUBSUELO Y ENSAYES DE LABORATORIO.**

Los numerosos estudios que se han realizado hasta hoy en relación con el subsuelo del valle de México han permitido a los doctores Ingenieros Raúl J. Marsal y Marcos Mazari, zonificar la Ciudad de México en tres grandes áreas, atendiendo a un punto de vista estratigráfico, clasificadas de la siguiente manera:

- Zona de Lomas (Zona I): constituida por terrenos compactos de origen volcánico, areno limosos, con alto contenido de grava y con tobas pumíticas bien cementadas. En general, la zona de Lomas presenta buenas condiciones para la cimentación de estructuras, la capacidad de carga del terreno es alta y no hay formaciones compresibles capaces de asentarse mucho. Sin embargo, debido a la explotación de minas de arena y grava, muchos predios pueden estar cruzados por galerías de desarrollo muy errático.

- Zona de Transición (Zona II): las condiciones del subsuelo bajo el punto de vista estratigráfico varían muchísimo de un punto a otro. En general aparecen depósitos superficiales arcillosos o limosos, orgánicos, cubriendo arcillas volcánicas muy compresibles que se presentan en espesores muy variables, con intercalaciones de arenas limosas o limpias, compactas; todo el conjunto subyace sobre mantos potentes de arena y grava.

- Zona de Lago (Zona III): llamada así por corresponder a los terrenos que constituyeron al antiguo lago de Texcoco. La alta compresibilidad y resistencia al corte de los estratos arcillosos que se localizan en esta zona, conjugadas con el fenómeno del hundimiento regional, son causa de cimentaciones costosas y en ocasiones, de comportamiento satisfactorio de las mismas.

## **2.1 Importancia de la exploración del subsuelo.**

Los trabajos de campo constituyen el inicio del estudio geotécnico. El objetivo de una investigación exploratoria, incluyendo pruebas de campo y laboratorio, es facilitar al ingeniero los datos cuantitativos del suelo y de la roca del sitio de interés, a fin de dar recomendaciones para la ejecución de la obra.

Para llegar en laboratorio a unos resultados razonablemente dignos, es preciso cubrir en forma adecuada la obtención de las muestras del suelo apropiadas para la realización de los ensayos correspondientes.

Debe procurarse siempre adquirir información preliminar suficiente respecto al suelo, que con ayuda de pruebas de clasificación tales como granulometrías, plasticidad, humedad, etc., permitan al ingeniero formarse una idea clara de los problemas que se han de esperar en cada caso particular.

Un aspecto de importancia fundamental en la exploración, es buscar la colaboración de ciencias que como la geología pueden dar información muy relevante, sobre todo en obras de importancia, ya que el reconocimiento geológico es imprescindible y el cual será previo a cualquier otra actividad realizada por el técnico de mecánica de suelos.

## **2.2 Zonificación geotécnica en la ubicación del proyecto.**

La zonificación geotécnica es una de las actividades anteriores a los análisis y modelamiento de la respuesta dinámica de los depósitos de suelo. Estos reportes presentan la información de la mecánica de suelos y los aspectos principales de la zonificación geotécnica del sitio de interés.

Con los análisis de estudios de los suelos, es posible tener una concepción general de las características de los mismos, con la finalidad identificar la falta de información y planificar nuevas exploraciones. De igual manera, cuando la información disponible es compilada y organizada apropiadamente, se convierte en un valioso complemento para la determinación y caracterización de las propiedades geotécnicas.

Como se mencionó anteriormente, la Zona de Lago es nombrada así por corresponder a los terrenos que constituyeron al antiguo lago de Texcoco. Un corte estratigráfico típico en esta zona exhibe los siguientes estratos:

Depósitos areno arcillosos o limosos, o bien rellenos artificiales de hasta 10.0 m de espesor.

Arcillas de origen volcánico, altamente compresibles, con intercalaciones de arena en pequeñas capas o en lentes.

La primera capa dura, de unos 3.0 m de espesor, constituida por materiales arcillo arenosos o limo arcillosos muy compactos. Esta capa suele localizarse a una profundidad del orden de 33.0 m.



Arcillas volcánicas de características semejantes a las del punto No. 2, aunque de estructuración más cerrada. El espesor de este manto oscila entre 4 y 14 m.

En algunos lugares, a partir de los 65 m se ha encontrado un tercer manto arcilloso compresible. Es claro que en la zona urbanizada pueden encontrarse variaciones importantes respecto a la anterior secuencia estratigráfica.

Una causa importante de diferente comportamiento mecánico en los suelos, radica en los antiguos monumentos aztecas o coloniales, hoy desaparecidos, pero que han inducido fuerte preconsolidación en zonas determinadas; hay lugares que por estos efectos la capa arcillosa superior no pasa de 20 m de espesor (Palacio Nacional); otra causa de diferencias es el bombeo disparejo en intensidad en los distintos puntos de la Ciudad.

Con base en estos criterios, la zona de lago ha sido subdividida por Marsal y Mazari en dos. La primera abarca la ciudad antigua y en ella son frecuentes diferencias por preconsolidación; la segunda, cubriendo aquella parte de la ciudad que no fue antes cargada con construcciones antiguas hoy inexistentes y que, por lo tanto, presenta mayor homogeneidad en propiedades mecánicas.

La alta compresibilidad y resistencia al corte de los estratos arcillosos que se localizan en la zona de lago, conjugadas con el fenómeno del hundimiento regional, son causa de cimentaciones costosas y en ocasiones, de comportamiento satisfactorio de las mismas.

En cimentaciones superficiales, la condición que generalmente rige es la impuesta por los asentamientos diferenciales tolerables por el tipo de estructuras que se trate. El hundimiento regional de la ciudad no impone condiciones al diseño de estas cimentaciones, con excepción de: a) edificaciones vecinas ligeras a edificios sobre pilotes, en cuyo caso deben tomarse en cuenta los asentamientos diferenciales en el terreno perimetral al área piloteada ocasionados por el hundimiento regional, y b) construcciones en terrenos con diferentes historias de carga o con espesores variables de los estratos compresibles (por ejemplo la Basílica de Guadalupe), en los cuales el hundimiento regional puede generar asentamientos diferenciales intolerables.

En ciertos conjuntos habitacionales con unidades pequeñas de tipo interés social, localizadas en la zona de alta compresibilidad, la construcción en serie ha permitido utilizar losas de cimentación en vez de zapatas, con una reducción considerable de los hundimientos diferenciales.

Otro factor que debe de tomarse en cuenta al diseñar la cimentación de construcciones ligeras con grandes claros entre columnas, como naves industriales, es el efecto de grietas de tensión que se presentan con las primeras lluvias en la zona de lago y de transición. Aunque se ha observado que

generalmente el agrietamiento no ocurre en superficies cubiertas exentas de variaciones estacionales de humedad, es conveniente tomar las providencias necesarias para evitar daños a las estructuras indicadas, mediante elementos de liga entre las zapatas, capaces de trabajar a tensión.

En edificios habitacionales o de oficinas hasta ocho pisos, con claros usuales, la capacidad de carga y la compresibilidad del subsuelo en la zona de lago hacen conveniente el empleo de las losas de cimentación. Generalmente se recurre en esos casos a cajones de cimentación para compensar el peso de los edificios.

Para edificios de mayor altura, el empleo de cimientos que transmiten la carga del subsuelo por contacto es generalmente prohibitivo, por razones económicas y de estabilidad de la propia construcción y de las adyacentes. En esos casos se emplean cimentaciones piloteadas. Los problemas creados en los pilotes por el hundimiento generalizado se han resuelto, en muchas ocasiones, mediante dispositivos para controlar la carga en la cabeza de los pilotes, o con pilotes de diseño especial.

## 2.3 Estudios preliminares.

Se realizaron los estudios de Mecánica de Suelos para un proyecto inmobiliario de usos múltiples. La distribución satelital se muestra en la Figura 3.

Para poder desarrollar los estudios preliminares, es indispensable realizar la consulta de mapas geológicos. En este caso se consultaron los mapas geológicos de la Cuenca del valle México y zonas colindantes (CFE1, Mooser, 1996), y el mapa de Zonificación Geotécnica del Distrito Federal (RCDF2.2004), mostrado en la Figura 4.

De acuerdo con la zonificación geotécnica para el valle de México, el terreno se localiza en Zona III-b o zona de lago, según la regionalización del subsuelo considerada en el Reglamento de Construcción de la Ciudad de México. Para esta zona se aplica el coeficiente sísmico **Cs = 0.45**.

Uno de los principales datos a destacar, es que la subsidencia de la zona donde se encuentra el sitio en estudio variaba de 7 a 8 cm/año en el último reporte que se ha publicado con los datos del hundimiento regional hasta 2005.



Figura 3. Distribución satelital del predio en estudio.

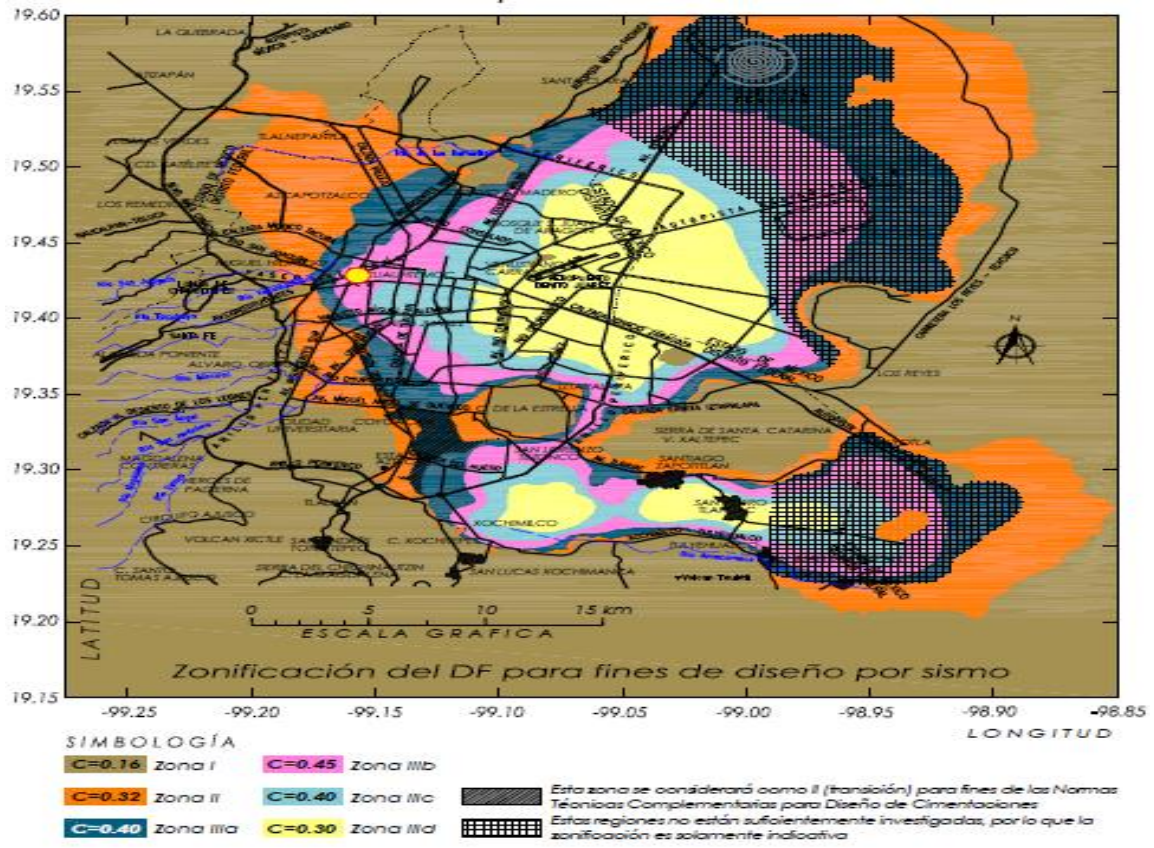


Figura 4. Localización del sitio en el mapa de Zonificación Sísmica.

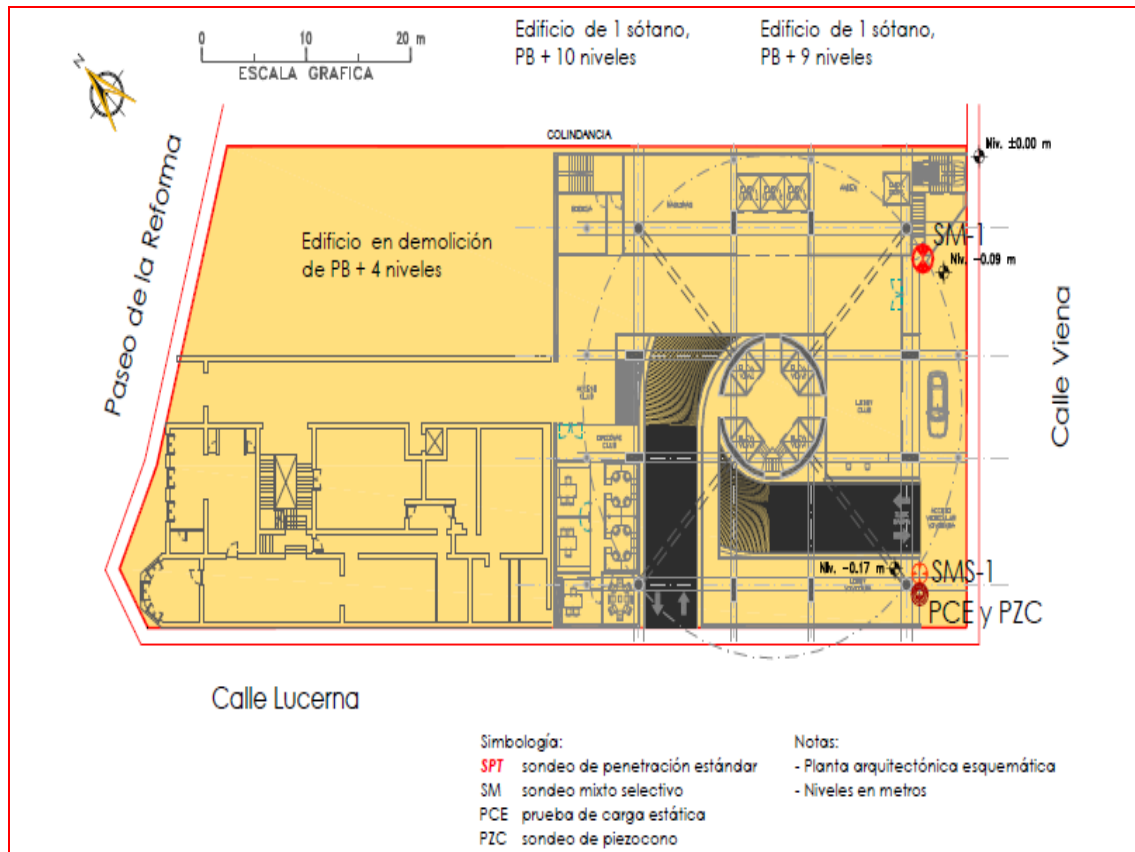
Una vez especificado el contexto del proyecto, se ubicaron los lugares de los sondeos, se planearon los estudios y se realizaron los muestreos de la zona para determinar las características estratigráficas y las propiedades mecánicas de los estratos del subsuelo del predio; posteriormente se estableció la capacidad de carga de diseño, la profundidad de desplante y los posibles procedimientos constructivos que se pueden emplear para la excavación de los sótanos, y con ello, garantizar la seguridad y protección de la obra y las colindancias. Estos son temas especializados y los cuales requieren de una buena planeación, ya que además de ser costosos y con tiempos de ejecución importantes, siempre debe preservarse la seguridad de los trabajos y del personal que labora dentro de la obra, reflejándose con buenos rendimientos, menor número de accidentes y disminuyendo los costos durante la ejecución del proyecto.

## **2.4 Trabajos de exploración geotécnica.**

De acuerdo a los requerimientos del proyecto, y con el objeto de conocer las características estratigráficas y físicas del subsuelo hasta la profundidad en donde son significativos los esfuerzos producidos por las cargas que transmitirá la estructura que se proyecta construir y elaborar un perfil del subsuelo, se realizaron los siguientes trabajos en la campaña de exploración (Figura 5):

- 1 Sondeo Mixto (SM), conformado por penetración estándar y cono eléctrico a 75.15 m de profundidad.
- 6 Pruebas Estáticas de Cono (PEC) para conocer la resistencia del suelo in situ.
- 5 Mediciones de presión del agua con Piezocono (PZC).
- 1 Sondeo de Muestreo Selectivo (SMS) para extracción de muestras inalteradas con Tubo Shelby.

Estos trabajos de campo fueron coordinados y supervisados por ingenieros especialistas en Mecánica de Suelos.



**Figura 5.** Planta con ubicación de sondeos.

## 2.5 Trabajos de laboratorio.

A continuación se enuncian las pruebas de laboratorio realizadas en las muestras obtenidas para determinar las propiedades índice y mecánicas de los materiales del subsuelo, a fin de fijar las recomendaciones del procedimiento constructivo para las excavaciones y el diseño de las estructuras de contención que más se adapten al proyecto.

Del Sondeo de Muestreo Selectivo (SMS), se extrajeron muestras inalteradas con Tubo Shelby, las cuales se etiquetaron y se trasladaron al laboratorio para realizar los ensayos siguientes:

- \* Clasificación SUCS y Propiedades Índices.
- \* Pruebas Triaxiales No Consolidadas No Drenadas.
- \* Pruebas de Consolidación Unidimensional.

## 2.6 Estratigrafía de diseño.

Como se mencionó anteriormente, el terreno en el que se proyecta construir el edificio se localiza en la Zona III-b o zona de lago (Figura 6), que se caracteriza por la presencia de grandes espesores de arcilla blanda de alta compresibilidad y baja resistencia que subyacen a una costra superficial endurecida de resistencia y espesor variable, aplicando un *Coefficiente sísmico de diseño*  $C_s = 0.45$ .

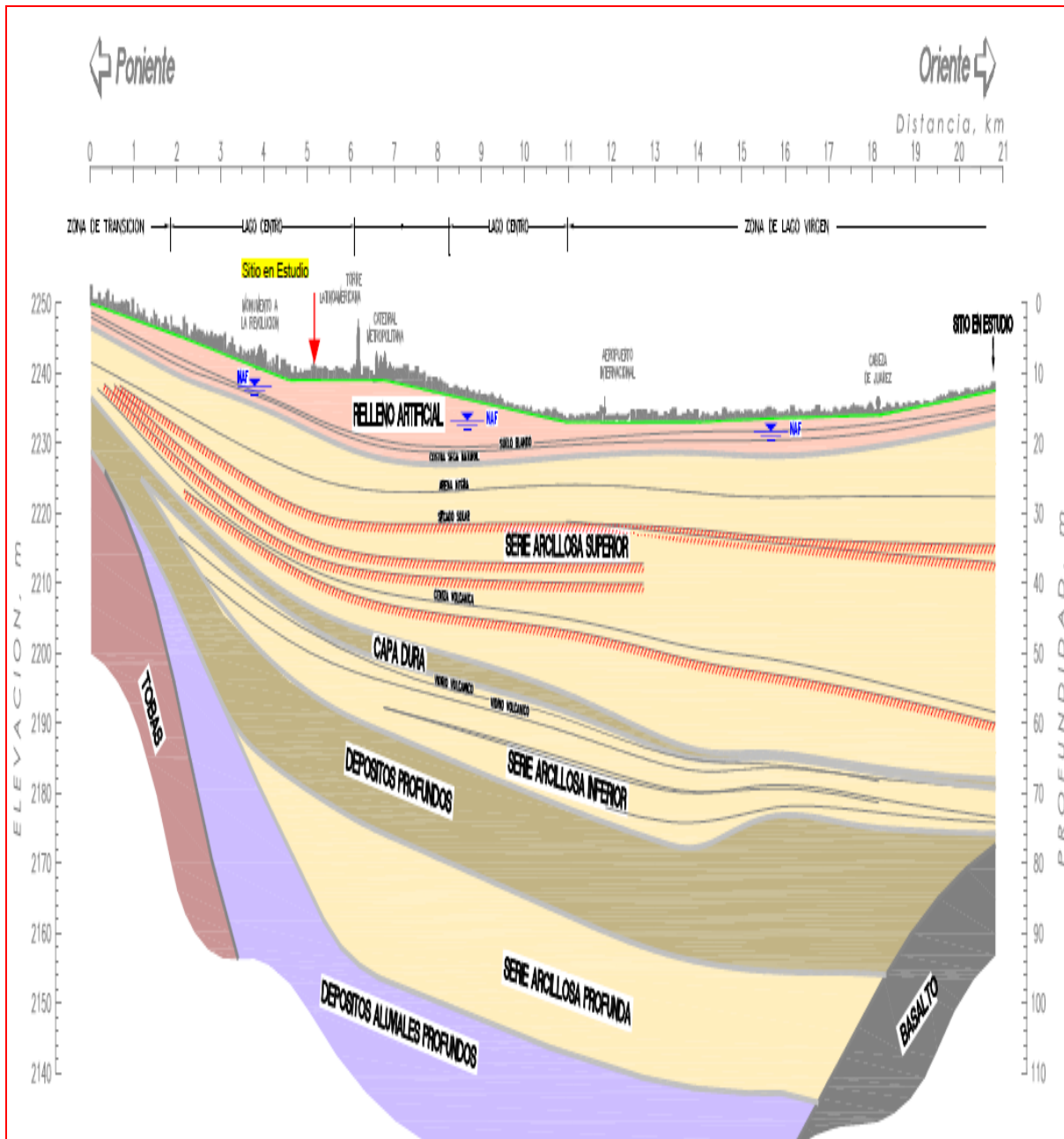
La estratigrafía y parámetros mecánicos de diseño de las distintas unidades geotécnicas (ver Tabla 1 y 2) son los siguientes:

Unidad	Prof. i. (m)	Prof. f. (m)	Descripción
U1	0.00	-5.00	Relleno Artificial y Costra superficial.
U2	-5.00	-20.00	Serie Arcillosa Superior 1. Arcillas de alta plasticidad.
U3	-20.00	-30.00	Serie Arcillosa Superior 2. Arcillas y Limos de alta plasticidad.
U4	-30.00	-34.00	Capa Dura. Limos arenosos con arcilla y ocasionalmente gravas.
U5	-34.00	-40.00	Serie Arcillosa Inferior 1. Estratos de Arcilla separados por lentes duros.
U6	-40.00	-58.00	Depósitos profundos. Serie de Arenas y gravas aluviales cementadas por arcillas duras y carbonatos de calcio.
U7	-58.00	-61.00	Serie Arcillosa profunda, tiene un numero de golpes $N_{spt}=25$
U7a	-61.00	-64.50	Serie Arcillosa profunda, tiene un numero de golpes $N_{spt}=95$
U7b	-64.50	-67.00	Serie Arcillosa profunda, tiene un numero de golpes $N_{spt}=30$
U7c	-67.00	-68.00	Serie Arcillosa profunda, tiene un numero de golpes $N_{spt}=100$
U7d	-68.00	-71.00	Serie Arcillosa profunda, tiene un numero de golpes $N_{spt}=25$
U8	-71.00	-75.15	Deposito Aluviales profundos, tiene un numero de golpes $N_{spt}>25$

**Tabla 1.** Secuencia estratigráfica.

Unidad	Prof. i. (m)	Prof. f. (m)	Descripción	$\gamma$ (t/m <sup>3</sup> )	C (t/m <sup>2</sup> )	$\phi^\circ$	Ks (t/m <sup>3</sup> )
U1	0.00	-5.00	Relleno Artificial y Costra superficial.	1.50	3.00	20	2000
U2	-5.00	-20.00	Serie Arcillosa Superior 1. Arcillas de alta plasticidad.	1.30	2.00	0	750
U3	-20.00	-30.00	Serie Arcillosa Superior 2. Arcillas y Limos de alta plasticidad.	1.30	3.50	5	1100
U4	-30.00	-34.00	Capa Dura. Limos arenosos con arcilla y gravas.	1.70	3.00	35	5000
U5	-34.00	-40.00	Serie Arcillosa Inferior 1. Estratos de Arcilla separados por lentes duros.	1.35	6.00	25	3400
U6	-40.00	-58.00	Depósitos profundos. Serie de Arenas y gravas aluviales cementadas por arcillas duras y carbonatos de calcio.	1.75	8.00	38	8500
U7	-58.00	-61.00	Serie Arcillosa profunda, tiene un número de golpes N <sub>spt</sub> =25	1.70	25.00	0	4000
U7a	-61.00	-64.50	Serie Arcillosa profunda, tiene un número de golpes N <sub>spt</sub> =95	1.75	8.00	32	5500
U7b	-64.50	-67.00	Serie Arcillosa profunda, tiene un número de golpes N <sub>spt</sub> =30	1.70	25.00	0	4000
U7c	-67.00	-68.00	Serie Arcillosa profunda, tiene un número de golpes N <sub>spt</sub> =100	1.75	8.00	32	5500
U7d	-68.00	-71.00	Serie Arcillosa profunda, tiene un número de golpes N <sub>spt</sub> =25	1.70	25.00	0	4000
U8	-71.00	-75.15	Deposito Aluviales profundos, tiene un número de golpes N <sub>spt</sub> >25	1.75	25.00	38	9500

**Tabla 2.** Propiedades del subsuelo consideradas en los análisis.



**Figura 6.** Perfil estratigráfico de la Ciudad de México.

En las Figuras 7 a 10 se muestran las gráficas de los perfiles estratigráficos de los sondeos profundos realizados en el sitio de estudio.



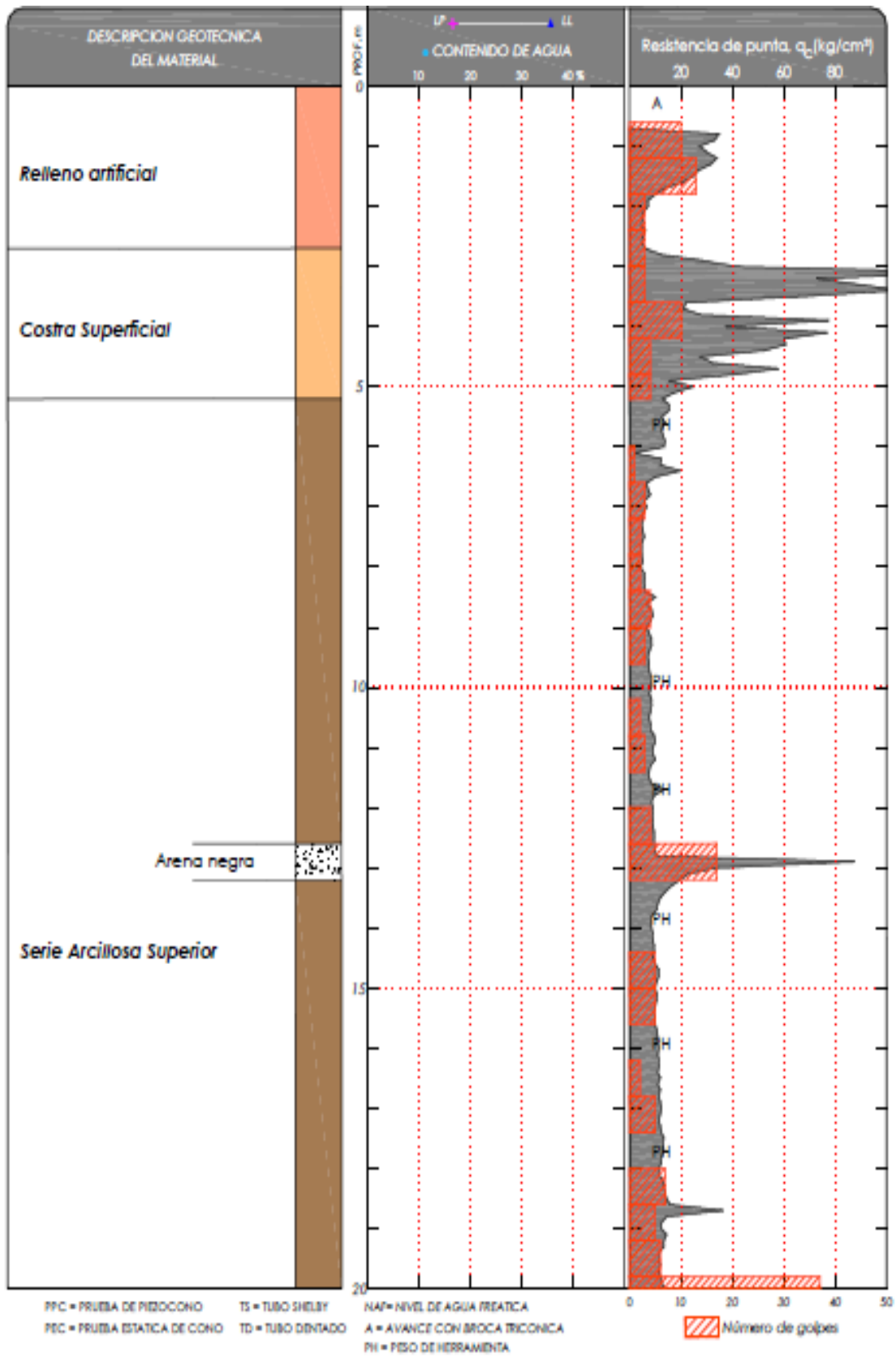


Figura 7. Gráfica del sondeo denominado SM-1 (gráfica 1 de 4).

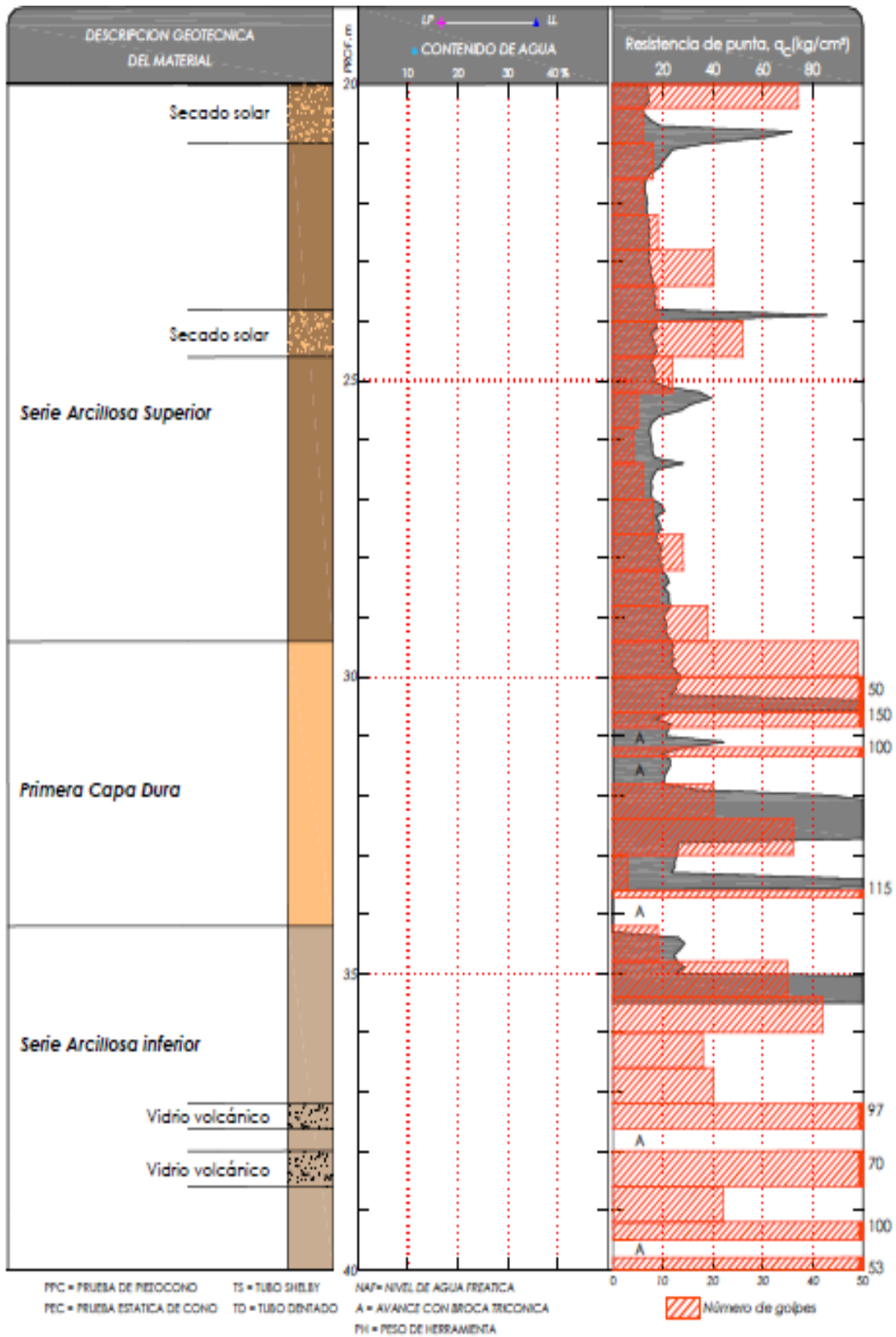


Figura 8. Gráfica del sondeo denominado SM-1 (gráfica 2 de 4).

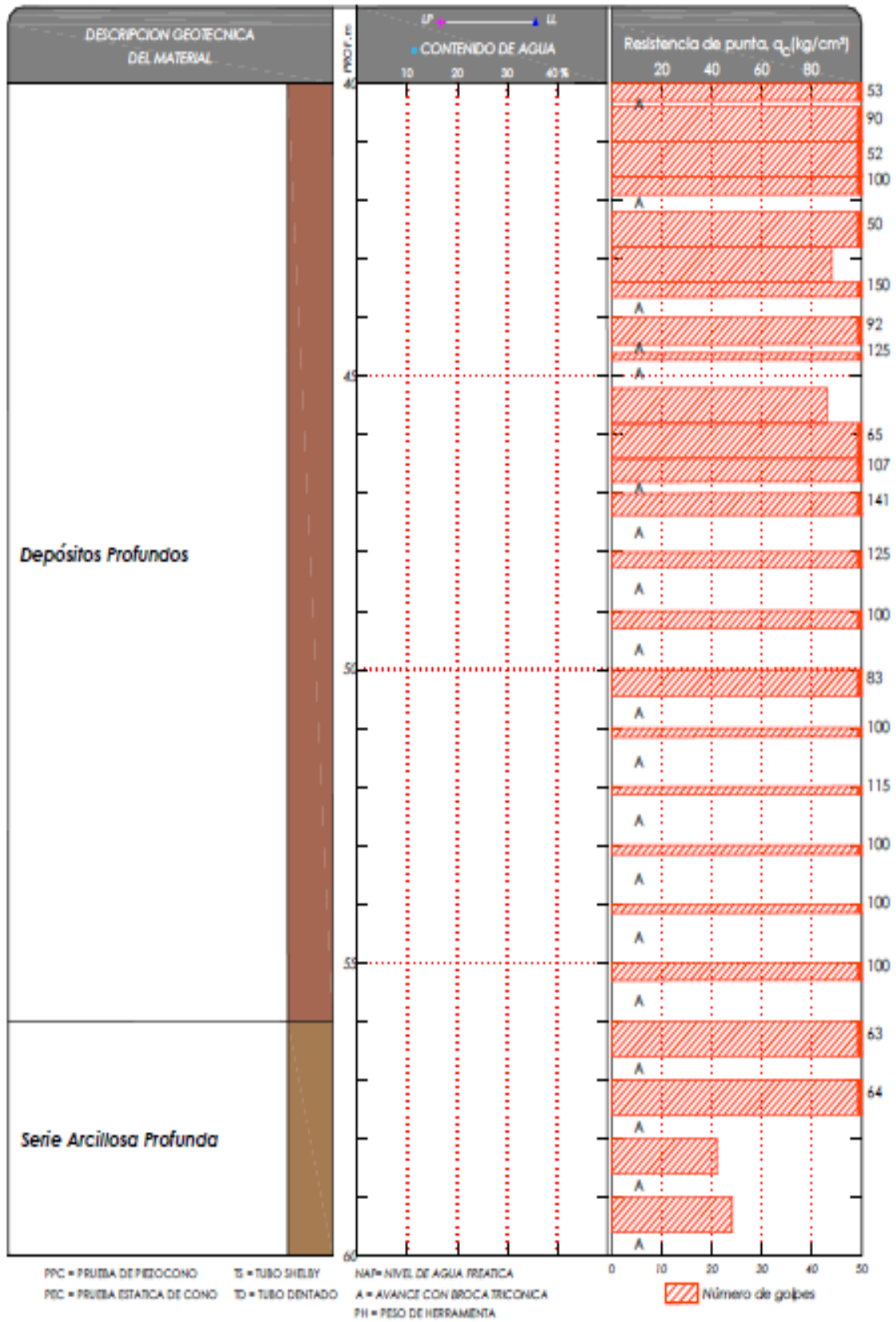


Figura 9. Gráfica del sondeo denominado SM-1 (gráfica 3 de 4).

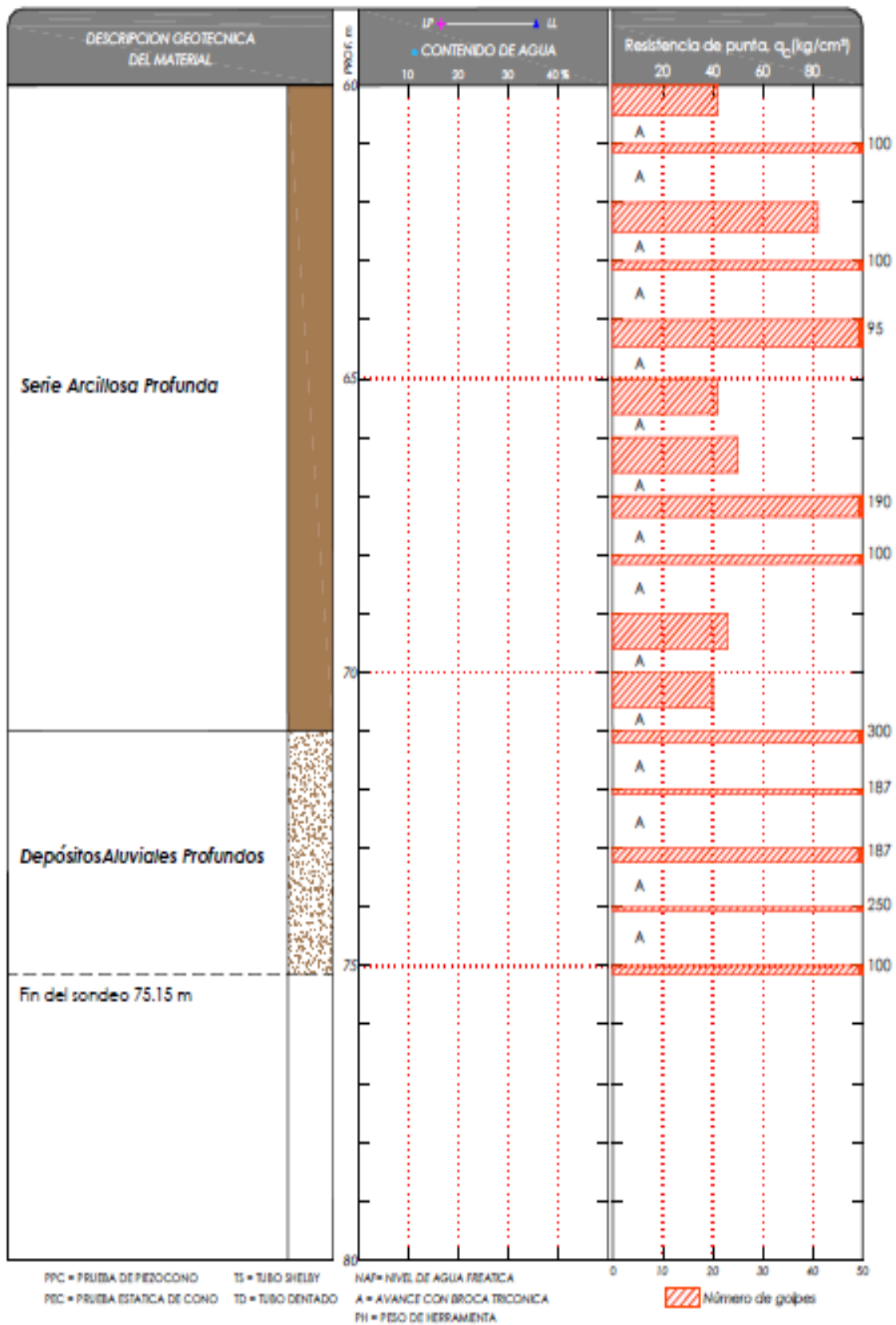


Figura 10. Gráfica del sondeo denominado SM-1 (gráfica 4 de 4).

## CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE EXCAVACIONES.

Durante la ejecución de cualquier proyecto donde se efectúe una excavación profunda, se tiende a encontrar con una gran diversidad de suelos a lo largo de la obra; desde suelos muy deformables hasta roca dura. En todo momento debe conocerse el área del subsuelo de tal manera que la incertidumbre sea mínima, procurando que el diseño geotécnico sea lo más apegado a la realidad. Las condiciones geológicas determinan el comportamiento de la excavación, así como el tipo y el procedimiento constructivo de los muros de retención.

Para el correcto diseño geotécnico de una excavación, se deben hacer las pruebas de campo y de laboratorio correspondientes, las cuales deben incluir los comportamientos básicos del suelo; el peso unitario, peso específico, contenido de agua, límites de Atterberg, etc. Al igual que las pruebas de comportamiento mecánico como la consolidación, resistencia al esfuerzo, etc.

La presencia de agua en el sitio es otro de los factores más importantes, el cual influye directamente en los métodos de construcción, las propuestas de diseño, la realización de los trabajos, los costos y tiempos de ejecución,. De acuerdo a los sondeos realizados en el sitio, el nivel de agua freática (NAF) fue detectado a 2.81 m de profundidad. Su presencia tan superficial denota que pueden existir fugas de cisternas vecinas y/o filtraciones de las instalaciones municipales.

Para el Reglamento de Construcción de la Ciudad de México (RCCDMX), las necesidades mínimas para construcciones pesadas, extensas o con excavaciones profundas serán dependiendo de su zonificación:

*Para ZONA I:*

1. Detección, por procedimientos directos, eventualmente apoyados en métodos indirectos, de rellenos sueltos, galerías de minas, grietas y otras oquedades.
2. Sondeos o pozos profundos a cielo abierto para determinar la estratigrafía y propiedades de los materiales y definir la profundidad de desplante.
3. La profundidad de la exploración con respecto al nivel de desplante será al menos igual al ancho en planta del elemento de cimentación, pero deberá abarcar todos los estratos sueltos o compresibles que puedan afectar el comportamiento de la cimentación del edificio.

*Para ZONA II:*

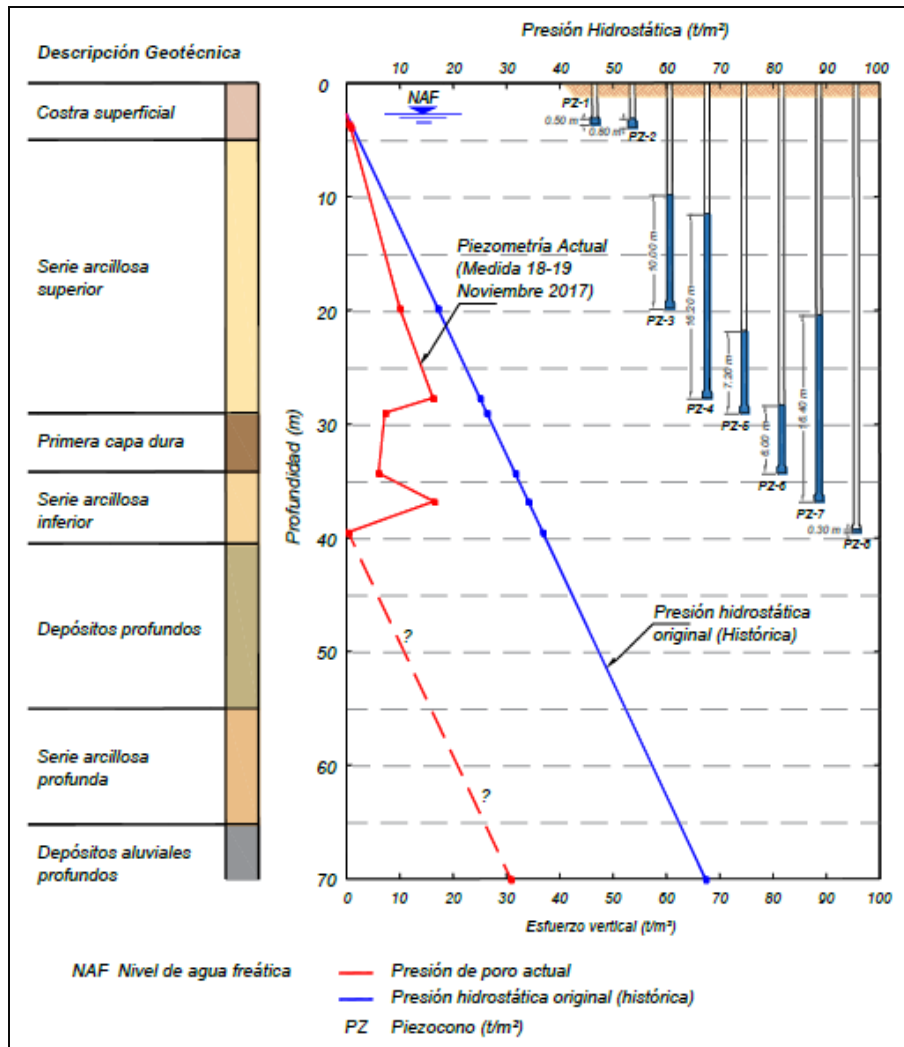
1. Inspección superficial detallada después de limpieza y despalme del predio para detección de rellenos sueltos y grietas.
2. Sondeos para determinar la estratigrafía y propiedades índice y mecánicas de los materiales del subsuelo y definir la profundidad de desplante mediante muestreo y/o pruebas de campo. En por lo menos uno de los sondeos, se obtendrá un perfil estratigráfico continuo con la clasificación de los materiales encontrados y su contenido de agua. Además, se obtendrán muestras inalteradas de los estratos que puedan afectar el comportamiento de la cimentación. Los sondeos deberán realizarse en número suficiente para verificar si el subsuelo del predio es uniforme o definir sus variaciones dentro del área estudiada.
3. En caso de cimentaciones profundas, investigación de la tendencia de los movimientos del subsuelo debidos a consolidación regional y determinación de las condiciones de presión del agua en el subsuelo, incluyendo detección de mantos acuíferos colgados.

*Para ZONA III:*

1. Inspección superficial detallada después de limpieza y despalme del medio para detección de rellenos sueltos y grietas.
2. Sondeos para determinar la estratigrafía, propiedades índice y mecánicas de los materiales y definir la profundidad de desplante mediante muestreo y/o pruebas de campo. En por lo menos uno de los sondeos se obtendrá un perfil estratigráfico continuo con la clasificación de los materiales encontrados y su contenido de agua. Además, se obtendrán muestras inalteradas de los estratos que puedan afectar el comportamiento de la cimentación. Los sondeos deberán realizarse en número suficiente para verificar si el subsuelo del predio es uniforme o definir sus variaciones dentro del área estudiada.
3. En caso de cimentaciones profundas, investigación de la tendencia de los movimientos del subsuelo debidos a consolidación regional y determinación de las condiciones de presión del agua en el subsuelo, incluyendo detección de mantos acuíferos colgados.

La realización de una excavación en suelo blando debe considerar un método constructivo que garantice la estabilidad de las paredes y del fondo de la misma, y en determinado caso, un sistema de bombeo eficiente.

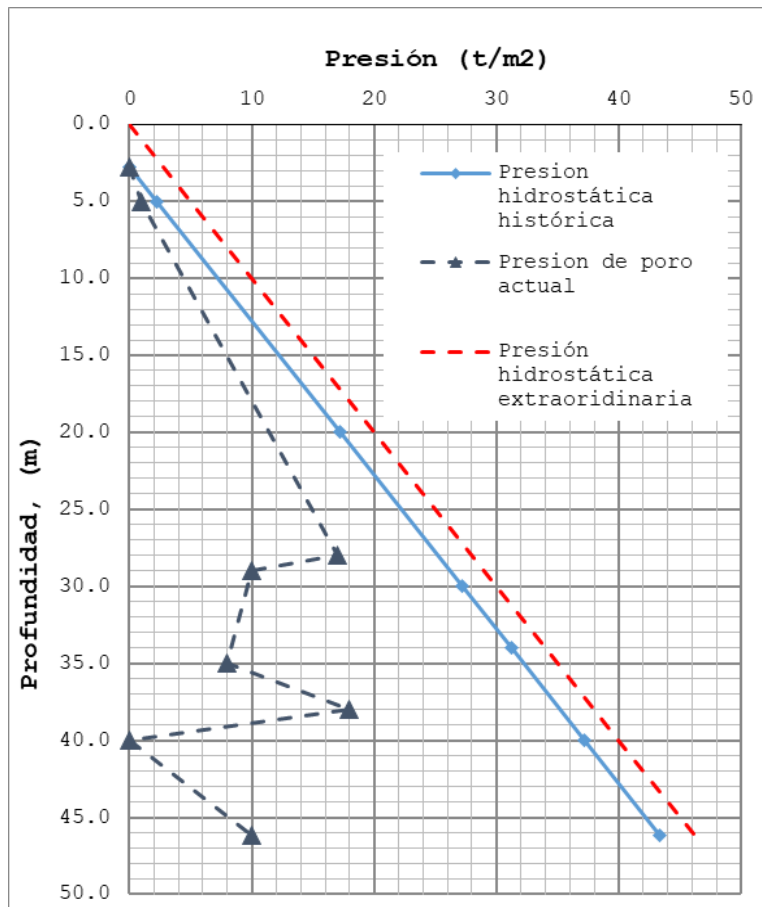
De acuerdo a los resultados de la estación piezométrica instalada, se detectó un abatimiento piezométrico muy importante, tal como se muestra a continuación en la Figura 11.



**Figura 11.** Distribución de presiones hidráulicas en el sitio.

En lo que respecta a las condiciones de piezometría, con base en experiencias previas en la zona y pronosticando condiciones de lluvia extraordinaria o fugas en las redes hidráulicas municipales, se propusieron dos condiciones de presiones para fines de análisis del muro Milán:

- *Condición normal*: Distribución de presiones piezométricas medidas en el sitio (ver Figura 11).
- *Condición extraordinaria*: Distribución de presiones hidrostáticas a partir de 0.00 m hasta el nivel -48.10 nivel de desplante del muro Milán.



**Figura 12.** Distribución de presiones hidráulicas normales y extraordinarias para fines de análisis.

### Presiones.

Las presiones horizontales del suelo fueron calculadas como:

$$\sigma_h = \sigma_h' + u \quad (3.1)$$

$$\sigma_h' = \sigma_v' K_0 \quad (3.2)$$



Donde:

$\sigma_h$ ; Esfuerzo horizontal total.

$\sigma'_h$ ; Esfuerzo horizontal efectivo.

$\sigma'_v$ ; Esfuerzo vertical efectivo.

$u$ ; Presión de poro.

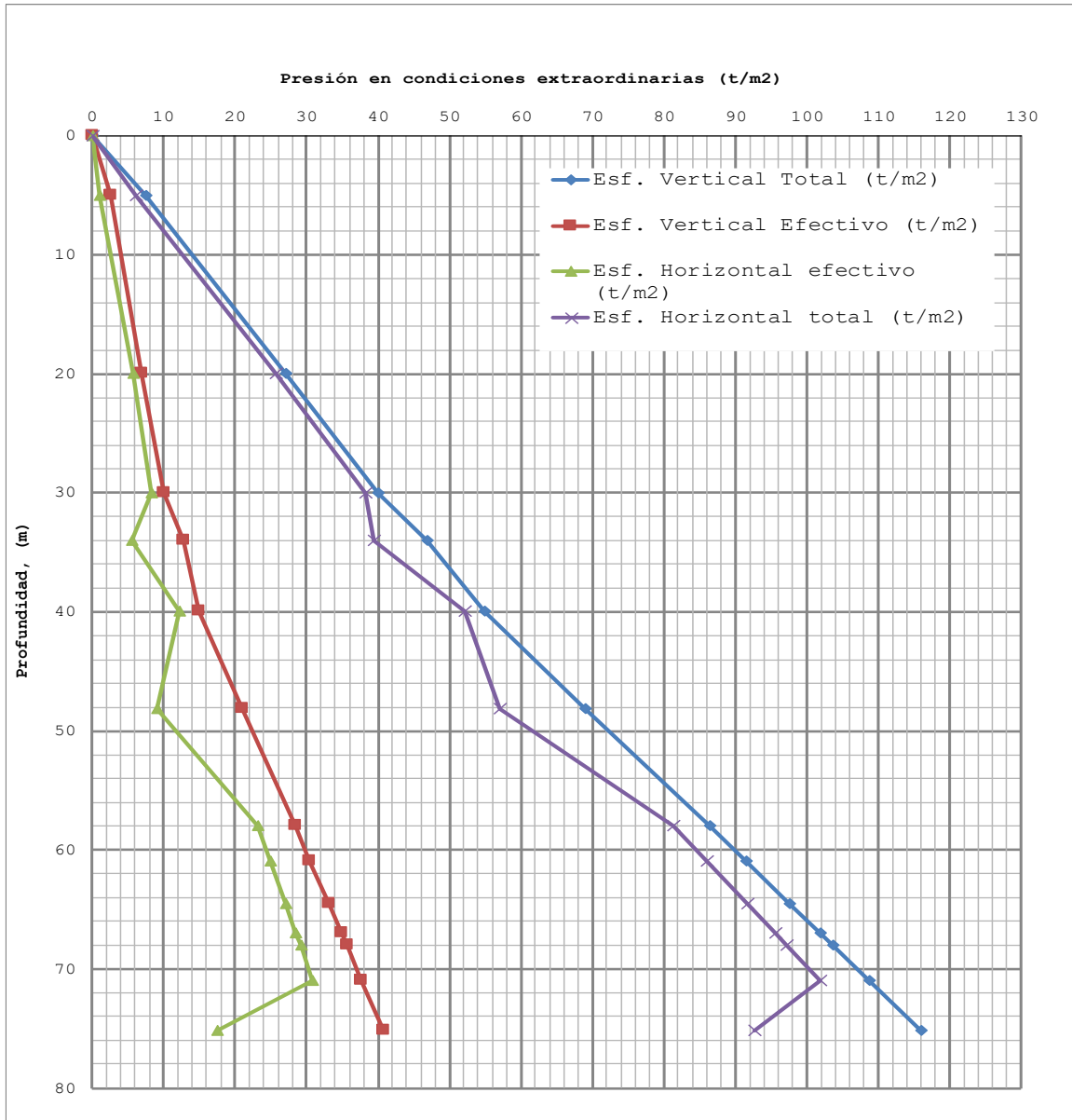
$K_0$ ; Coeficiente de empuje horizontal (pasivo o en reposo).

Condiciones estratigráficas del sitio											NAF= 2.81 m			
Estrato	de:	a:	espesor (m)	$\gamma$ (t/m <sup>3</sup> )	$c$ (t/m <sup>2</sup> )	$\phi$	$v$	$k_0$	$u$ (t/m <sup>2</sup> )	$P_v$ (t/m <sup>2</sup> )	Esf. Vertical Total (t/m <sup>2</sup> )	Esf. Vertical Efectivo (t/m <sup>2</sup> )	Esf. Horizontal efectivo (t/m <sup>2</sup> )	Esf. Horizontal total (t/m <sup>2</sup> )
											0.00	0.00	0.00	0
U1	0.00	-2.81	2.8	1.50	3.0	20	0.30	0.43	0.00	4.22	4.22	4.22	1.81	1.81
	-2.81	-5.00	2.2	1.50	3.0	20	0.30	0.43	1.00	3.29	7.50	6.50	2.79	3.79
U2	-5.00	-20.00	15.0	1.30	2.0	0	0.45	0.82	8.00	19.50	27.00	19.00	15.55	23.55
U3	-20.00	-28.00	8.0	1.30	3.5	5	0.45	0.82	17.00	10.40	37.40	20.40	16.69	33.69
U4	-30.00	-34.00	4.0	1.70	3.0	35	0.30	0.43	9.00	6.80	46.80	37.80	16.20	25.20
U5	-34.00	-35.00	1.0	1.35	6.0	25	0.45	0.82	8.00	1.35	48.15	40.15	32.85	40.85
U6	-40.00	-46.20	6.2	1.75	8.0	38	0.30	0.43	10.00	10.85	65.75	55.75	23.89	33.89
U7	-58.00	-61.00	3.0	1.70	25.0	0	0.45	0.82	24.8	5.10	91.50	66.70	54.57	79.37
U7a	-61.00	-64.50	3.5	1.75	8.0	32	0.45	0.82	28.3	6.13	97.63	69.33	56.72	85.02
U7b	-64.50	-67.00	2.5	1.70	25.0	0	0.45	0.82	30.8	4.25	101.88	71.08	58.15	88.95
U7c	-67.00	-68.00	1.0	1.75	8.0	32	0.45	0.82	31.8	1.75	103.63	71.83	58.77	90.57
U7d	-68.00	-71.00	3.0	1.70	25.0	0	0.45	0.82	34.8	5.10	108.73	73.93	60.48	95.28
U8	-71.00	-75.15	4.2	1.75	25.0	38	0.30	0.43	39.0	7.26	115.99	77.04	33.02	71.97

**Tabla 3.** Cálculo de presiones en condiciones Normales.

Estrato	de:	a:	espesor (m)	$\gamma$ (t/m <sup>3</sup> )	$c$ (t/m <sup>2</sup> )	$\phi$	$v$	$k_0$	$u$ (t/m <sup>2</sup> )	$P_v$ (t/m <sup>2</sup> )	Esf. Vertical Total (t/m <sup>2</sup> )	Esf. Vertical Efectivo (t/m <sup>2</sup> )	Esf. Horizontal efectivo (t/m <sup>2</sup> )	Esf. Horizontal total (t/m <sup>2</sup> )
											0.00	0.00	0.00	0
U1	0.00	-5.00	5.0	1.50	3.0	20	0.30	0.43	5.00	7.50	7.50	2.50	1.07	6.07
U2	-5.00	-20.00	15.0	1.30	2.0	0	0.45	0.82	20.00	19.50	27.00	7.00	5.73	25.73
U3	-20.00	-30.00	10.0	1.30	3.5	5	0.45	0.82	30.00	13.00	40.00	10.00	8.18	38.18
U4	-30.00	-34.00	4.0	1.70	3.0	35	0.30	0.43	34.00	6.80	46.80	12.80	5.49	39.49
U5	-34.00	-40.00	6.0	1.35	6.0	25	0.45	0.82	40.00	8.10	54.90	14.90	12.19	52.19
U6	-40.00	-48.10	8.1	1.75	8.0	38	0.30	0.43	48.10	14.18	69.08	20.98	8.99	57.09
-	-48.10	-58.00	9.9	1.75	8.0	38	0.45	0.82	58.00	17.33	86.40	28.40	23.24	81.24
U7	-58.00	-61.00	3.0	1.70	25.0	0	0.45	0.82	61.00	5.10	91.50	30.50	24.95	85.95
U7a	-61.00	-64.50	3.5	1.75	8.0	32	0.45	0.82	64.50	6.13	97.63	33.13	27.10	91.60
U7b	-64.50	-67.00	2.5	1.70	25.0	0	0.45	0.82	67.00	4.25	101.88	34.88	28.53	95.53
U7c	-67.00	-68.00	1.0	1.75	8.0	32	0.45	0.82	68.00	1.75	103.63	35.63	29.15	97.15
U7d	-68.00	-71.00	3.0	1.70	25.0	0	0.45	0.82	71.00	5.10	108.73	37.73	30.87	101.87
U8	-71.00	-75.15	4.2	1.75	25.0	38	0.30	0.43	75.15	7.26	115.99	40.84	17.50	92.65

**Tabla 4.** Cálculo de presiones en condiciones Extraordinarias.



**Figura 13.** Distribución de esfuerzos verticales y empujes horizontales, condición extraordinaria.

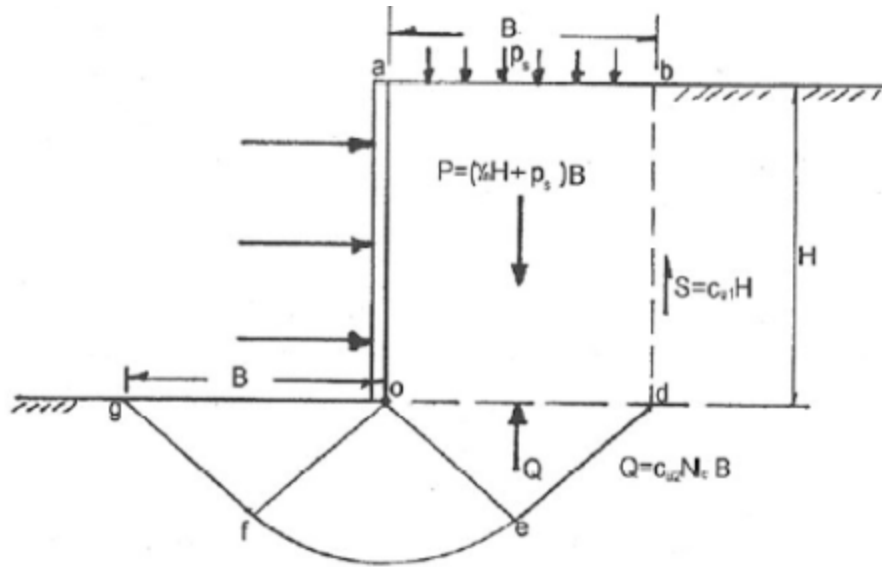
Como puede observarse, los empujes laterales fueron calculados considerando coeficientes de empuje en reposo, dado que el desplazamiento del muro y, por tanto, del suelo, incluso al momento de excavar, serán prácticamente nulos.

Los valores de  $K_0$  fueron estimados, de manera conservadora y práctica, como  $v/(1-v)$ .

De acuerdo al nivel de desplante del muro Milán a 48.10 m de profundidad, el esfuerzo horizontal total máximo es de 57.09 t/m<sup>2</sup> (ver Tabla 4).

### Revisión del fondo de la excavación.

En la Figura 14 se muestra un posible mecanismo de falla de fondo:



**Figura 14.** Mecanismo de falla de fondo.

El Factor de Seguridad ante falla de fondo puede estimarse, como:

$$FS = \frac{(Su \times Nc) + S}{\gamma H + q} \dots \dots \dots (3.3)$$

$$Nc = 5.14 \left( 1 + 0.20 \frac{H}{B} + 0.20 \frac{B}{L} \right) \dots \dots \dots (3.4)$$

Donde,

$Su = 8.0 \text{ t/m}^2$  Resistencia no drenada media a lo largo de la superficie de falla

$Y = 1.75 \text{ t/m}^3$  Peso volumétrico medio del suelo hasta la prof. de excavación

$H = 46.65 \text{ m}$  Profundidad de excavación

$q = 2.0 \text{ t/m}^2$  Sobrecarga en superficie

$B = 35.10 \text{ m}$  Ancho de la excavación

$L = 35.10 \text{ m}$  Largo de la excavación

Donde,

$$S = S_u H \dots\dots\dots (3.4)$$

$$S = 8.0 \times 46.65 \text{m} = 373.2 \text{ t/m}^2$$

Para la aplicación de estas expresiones debe considerarse:

$$\frac{H}{B} \leq 2.0$$

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

$$\frac{H}{B} = \frac{46.65}{35.10} = 1.32 \leq 2$$

$$\frac{B}{L} = \frac{35.10}{35.10} = 1.0 \leq 1.0$$

Sustituyendo valores en ec. 3.4, tenemos:

$$N_c = 5.14(1 + 0.20(1.32) + 0.20(1.0))$$

$$N_c = 7.52$$

Sustituyendo valores en ec. 3.3, tenemos:

$$FS = \frac{(8.0 \times 7.52) + 373.2}{(1.75 \times 46.65) + 2.0} = 5.18$$

El Factor de Seguridad es de 5.18, el cual es mayor que el mínimo aceptable de 1.3, según el Manual de Construcción Geotécnica, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos. 2002.

### Revisión por flotación.

La estabilidad por flotación de la estructura se revisó con la siguiente expresión:

$$FS = \frac{W + F_{fricc}}{F} \dots\dots\dots (3.5)$$

Donde,

W = Peso total de la estructura, incluyendo muros, losa, etc.

Ffricc = Fuerza de fricción en la cara exterior del muro,

F = Fuerza de flotación.

Considerando,

Profundidad máxima de excavación NME = 46.65 m

Profundidad Desplante de muro Milán Hm = 48.10 m

Diámetro interior de la lumbrera  $\phi_{int}$  = 35.10 m

Diámetro exterior de la lumbrera  $\phi_{ext}$  = 37.10 m

Área interna de la base = 967.62 m<sup>2</sup>

Espesor losa de fondo = 1.00 m

Peso del muro Milán = 13,092 t (considerando peso volumétrico del concreto de 2.4 t/m<sup>3</sup>)

Peso de losa de fondo = 2,322.28 t (considerando peso volumétrico del concreto de 2.4 t/m<sup>3</sup>)

Peso total de la estructura x 0.9 = 13,872.85 t

Presión hidráulica máxima = 43.84 t/m<sup>2</sup>

Resistencia al corte no drenada media a lo largo de la lumbrera Su= 8.81 t/m<sup>2</sup>

Fuerza de fricción en las paredes de la lumbrera:

$$F_{fricc} = \pi \phi_{ext} * Hm * Su = \pi * 37.10 * 48.10 * 8.81 = 49,390.65 \text{ t}$$

Fuerza de Flotación = Axu = 42,420.46 t

Sustituyendo valores en ec. 3.5, tenemos:

$$FS = \frac{13,872.85 + 49,390.65}{42,420.46} = 1.49$$

Se tiene un factor de seguridad de 1.49 el cual es satisfactorio (Factor de Seguridad mínimo aceptable de 1.3, según el Manual de Construcción Geotécnica, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos. 2002).

### 3.1 Métodos de excavación.

Las excavaciones profundas en suelos blandos presentan un difícil reto para los ingenieros (Auvinet y Romo, 1998). En varias ocasiones, al momento de excavar nos encontramos con condiciones diferentes a las esperadas, por lo que contar con estudios precisos de mecánica de suelos y tomar en cuenta la historia de las construcciones que ya se encuentran en el lugar, sirve para tener referencias de cómo se han resuelto los problemas de ingeniería, y con ello hacer una correcta elección del mejor método de diseño y una buena simulación del suelo.

La elección de un método apropiado de excavación en suelo blando debe tomar en cuenta factores como la profundidad de excavación y sus dimensiones, las propiedades mecánicas del suelo y las condiciones en las que se encuentra, así como la existencia de estructuras vecinas. Todos estos factores condicionan el proceso constructivo, a esto se debe que exista una gran variedad de técnicas que han sido y continúan siendo usadas para realizar excavaciones profundas en suelos arcillosos.

Un diseño de excavación completo debe de incluir por lo menos: el método de análisis de estabilidad, un plan de bombeo, los métodos simplificados y avanzados para la deformación y esfuerzos, el diseño de los componentes estructurales y la protección del inmueble, entre otros.

Existen diversos métodos de excavación, por un lado tenemos las excavaciones que son de tipo cielo abierto y por otro las que son de tipo Top-Down. La diferencia principal está en el procedimiento constructivo. En ambos métodos su principio es estabilizar la zona de excavación por medio de muros diafragma.

Primeramente en el **método de Top-Down** se estabilizan las paredes del muro de contención utilizando algún sistema de arriostramiento, por ejemplo, con la construcción de losas o colocación de troqueles a cada determinado nivel.

Por otro lado las **excavaciones a cielo abierto**, las cuales se pueden ademar construyendo muros circulares autoestables, como lo es en nuestro caso de estudio. Otras opciones son hacer uso de anclas con concreto lanzado, o bien, solo usando taludes.

### 3.1.1 Método de excavación en Top-Down.

A este método se le denomina *Top-Down* por llevar un proceso constructivo desde arriba hacia abajo, es decir, se va construyendo desde el nivel de banqueta hacia el nivel de desplante del edificio o losa de fondo. El principio de este proceso constructivo es estabilizar el muro de contención para poder seguir excavando. Durante cada etapa de excavación se construyen además temporales y/o definitivos que funcionan como diagramas horizontales, permitiendo contrarrestar los empujes laterales de los suelos sobre el muro. Este sistema muro-soporte nos brinda una gran rigidez, provocando que no existan desplazamientos en el muro de contención que afecten a las colindancias. Esta técnica permite que la superestructura se vaya construyendo al mismo tiempo que se realiza la excavación.

Otro de los principios de este método es excavar bajo losas previamente coladas (las excavaciones se hacen generalmente a doble altura). La primera etapa de este proceso comprende la construcción perimetral del muro Milán, así como la colocación de perfiles de acero en el subsuelo que posteriormente son embebidos con concreto, desarrollando pilas que formarán parte de la cimentación de la superestructura y estarán ligadas con las losas de entrepiso, planta baja y losa de fondo.

Como segunda etapa, se coloca una plataforma de trabajo (losa tapa), generalmente esta sección la conforma la losa de planta baja, se deja una lumbrera con el fin de retirar el material existente por debajo de ella. La plataforma de trabajo debe tener diferentes características a las losas de entresijos, ya que en esta se colocarán equipos pesados, entre ellos se encuentran las grúas que bajarán los equipos de excavación, las almejas que removerán el material de la excavación, los camiones de carga que se localizan sobre la plataforma de trabajo y también las ollas de concreto presentes durante los colados.

La excavación se inicia retirando todo el material en el área de la lumbrera hasta el nivel de desplante de la siguiente losa (se realiza un sobre-excavado para la colocación de la cimbra), generalmente con una excavadora CAT 320 o similar, posteriormente se extiende la excavación por medio de equipos minis hacia los costados, hasta encontrar el muro Milán por debajo de la losa llevando el material hasta el área de la lumbrera para su retiro.

Una vez terminada la excavación, se coloca una platilla donde se apoyará la cimbra de la losa a colar, dejando una lumbrera en la misma área. Ya con la resistencia requerida de la losa, se podrá excavar hacia el siguiente nivel. Nuevamente se inicia la excavación en el área de la lumbrera y se sigue el mismo proceso hasta llegar al desplante de la losa de fondo para su colado.

En algunas obras, los sistemas de arriostramiento son muy importantes para asegurar la estabilidad de la excavación. Además de las losas diafragma trabajando como ademe, el uso de la precarga en puntales para disminuir los desplazamientos en los muros ha demostrado ser también una alternativa efectiva. No importa si la precarga con la que se utilicen los puntales sea la mitad de la carga necesaria, siempre ayudará a prevenir el movimiento del muro.



**Figura 15.** Uso de precarga en excavaciones. (Honvajec, Joseph. 2015).

Algunos de los puntos que deben tomarse en cuenta durante el proceso constructivo del método Top-Down los siguientes:

- Que la excavación no exceda el nivel de desplante de la losa a construir.
- No golpear los perfiles precimentados, los cuales serán las columnas de los entresijos.
- No golpear el muro Milán, ya que esto puede disminuir su resistencia.
- Los equipos de excavación deben forzosamente contar con un catalizador reductor de gases contaminantes.
- Contar con ventilación y extracción de gases a cada nivel de excavación.
- Tener iluminación suficiente en todas las áreas de trabajo.
- Abatir el nivel de agua freática (en caso de existir).
- Contar con un cárcamo de achique y una bomba para retirar el exceso de agua, en caso de no controlar el NAF o si se presenta una tormenta.



Por lo anterior, queda claro que es un sistema complejo y estricto para desarrollarlo, ya que su ejecución está en función del diseño del muro de retención. Al realizar el análisis, se debe tener en cuenta la excavación a doubles alturas, debido a que estas generarán mayores esfuerzos, momentos y desplazamientos, por tal motivo se necesita de un muro más rígido.

En la Figura 16 y 17 se muestran fotografías de un proyecto ejecutado con este método constructivo.



**Figura 16.** Ejecución de proyecto "MIRA, Río San Joaquín 498" con método Top-Down. (CIMESA, 2018).



**Figura 17.** Ejecución de obra con método Top-Down; proyecto "MIRA, Río San Joaquín 498". (CIMESA, 2018).

### 3.1.2 Método de excavación con anclas.

Durante las visitas a obra realizadas para la asignatura de "Construcción de Obras Subterráneas y Cimentaciones", el M. I. Juan Paulín Aguirre (2018) nos comenta que después de una excavación a cielo abierto además con un muro circular autoestable, el proceso constructivo que mejor rendimiento de excavación ofrece es aquél en donde los muros están retenidos con anclas. Para un mayor beneficio dentro de esta técnica, el muro perimetral utilizado deberá de ser estructural y definitivo. Este se construye como muro Milán o concreto lanzado y anclas de gran capacidad para reducir el número de ellas. Dentro de las diferencias que encontramos entre muro Milán y muros de concreto lanzado, es que el muro Milán se construye antes de iniciar la excavación; mientras que el muro de concreto lanzado, es construido de arriba hacia abajo formando cinturones los cuales después de ser estabilizados se procede a iniciar la siguiente etapa de excavación. Es importante recalcar que se deberá revisar la estabilidad del muro, ya que en caso de fallar, esta puede ser de tipo local hasta general.

Para zonas donde se encuentre el NAF sobre la superficie, el muro a base de concreto lanzado no será la mejor opción, debido a que se puede comprometer la estanqueidad de la excavación junto con las posibles filtraciones al interior de la misma, generando asentamientos en las colindancias del predio.

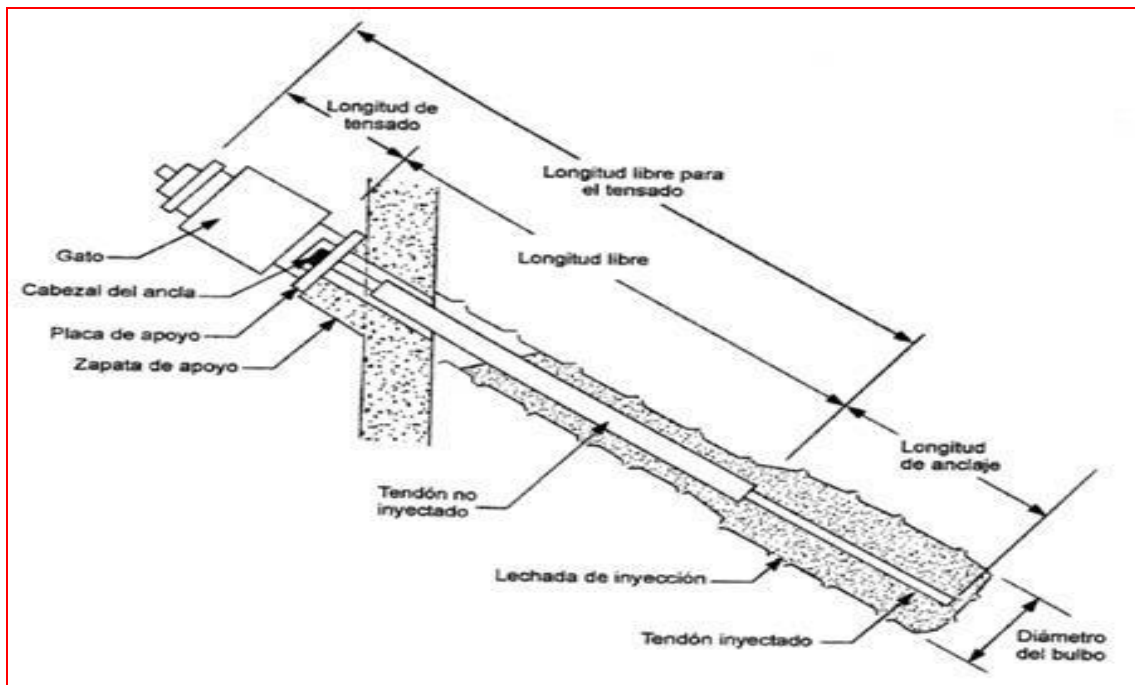
A saber, las anclas son elementos estructurales los cuales tienen la función de transmitir un esfuerzo de tensión a un estrato resistente, y cuya finalidad es estabilizar un talud, una excavación o una galería subterránea. La configuración de las anclas está compuesta por tres secciones: longitud de bulbo, longitud libre y longitud de tensado.

- Longitud de bulbo: Es la sección que está constituida por los cables de torón y el tubo de inyección. Deberá de estar completamente recubierta por la lechada de vaina e inyección. Transmite su esfuerzo de tensión al suelo.
- Longitud libre: Está compuesta por los cables de torón, tubo de inyección y separadores. Se aísla del terreno mediante un tubo de poliducto y se delimita con el bulbo a través de un tapón de interface.
- Longitud de tensado: Es aquella longitud extra del cable la cual permite el montaje del equipo para tensar el ancla o efectuar pruebas de carga a la misma.

La Figura 18 muestra la imagen de un proyecto ejecutado con anclas de gran capacidad realizado por la empresa CIMESA en el año 2018.



**Figura 18.** Excavación a cielo abierto estabilizada con anclas. Proyecto "ATANA, Lindavista". (CIMESA, 2018).



**Figura 19.** Composición de un ancla (ICE, 2011).

El procedimiento de construcción de los muros estabilizados con anclas es el siguiente:

1. Durante el proceso de construcción del muro Milán, se dejan las reservaciones previas para la colocación de las anclas.
2. Se descubren las preparaciones y se hacen las perforaciones del hueco hasta la profundidad deseada.
3. Se coloca lechada dentro del hueco.
4. Se introduce el tensor en el hueco.
5. Se envaina el tensor.
6. Se equipa la reservación (colocación de silleta).
7. Se hace la prueba de carga al ancla.
8. Se bloquea el ancla a la carga de diseño.

### **Pantallas de contención.**

Un muro pantalla de contención es una estructura esbelta que actúa como una yuxtaposición de vigas verticales, las cuales se encuentran en interacción con los empujes activos del terreno, agua y cargas de servicio. Absorbe las reacciones que se generan al momento de excavar dejándola en equilibrio. Este tipo de pantalla puede arriostrarse mediante anclaje, troqueles o elementos definitivos de la estructura que se construyera bajo la protección de la pantalla.

Este tipo de muro nos permite encontrar el equilibrio con el empuje pasivo. Puede ser usado como estructura definitiva del edificio, y en el caso de muro continuo, nos ayuda a controlar los riesgos hidráulicos.

Las pantallas de contención se dividen en dos:

- *Pantallas continuas*: muro pantalla in situ, pantalla prefabricada, pantalla de tablestacas, pantalla de lechada armada, pilotes secantes, entre otras.
- *Pantallas discontinuas*: pantalla berlinese, pantalla parisina, pantalla moscovita, pilotes tangentes, etc.

### **Pantallas continuas.**

#### Muros pantalla.

Conocido también como muro Milán o muro diafragma, se trata de una pared tablestaca de concreto reforzado conformada en el subsuelo. Su procedimiento de construcción se puede dividir en tres: perforación de la zanja, colocación del armado y vaciado de concreto. La estabilidad de la zanja durante el proceso de

excavación se alcanza con ayuda de un lodo de perforación. Este lodo es fabricado con bentonita, creando en las paredes de la perforación un depósito estanco conocido como “cake”, el cual permite a este fluido no percolar en el terreno y a su vez asegurar la presión hidrostática, garantizando la estabilidad de la zanja.

El cake tiene como características principales ser resistente e impermeable; su realización se mide con vernier, y sus parámetros deberán ser:

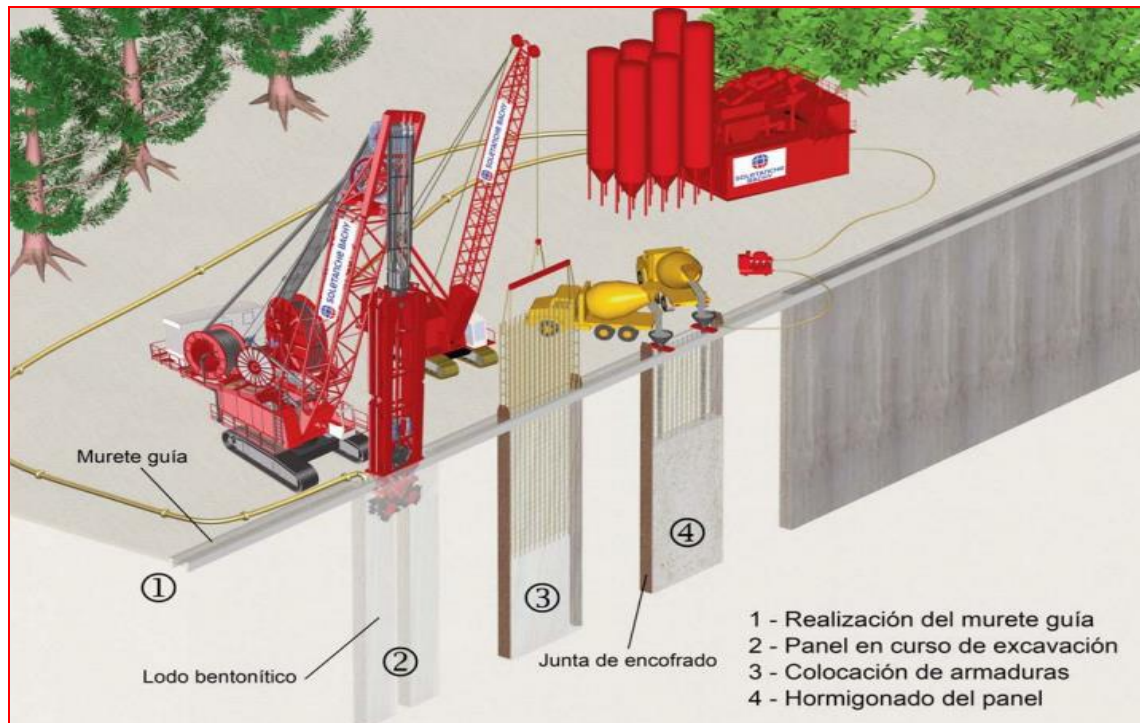
- Lodo nuevo < 1 mm
- Antes del colado < 3 mm



**Figura 20.** Resultado prueba de Cake en lodo bentonítico antes de colar muro Pantalla. (CIMESA, 2016).

Generalmente, para la construcción del muro pantalla, la primera etapa indica realizar un brocal, el cual está conformado por dos muros de concreto de 20 a 30 cm de ancho alineados paralelamente. Algunas de sus funciones principales son:

- Construir el muro Milán definiendo su trazado con precisión.
- Guiar la herramienta de perforación.
- Asegurar una reserva de lodo de perforación.
- Retener el suelo de posibles caídos al inicio de la excavación.
- Descansar las jaulas para el armado.



**Figura 21.** Proceso constructivo de muro Pantalla. (CIMESA, 2012).

Posteriormente, con el fin de asegurar la estabilidad de la lumbra durante los trabajos, la perforación se realiza a través de paneles de longitud limitada (variable dependiendo del suelo y entorno).

Se procede a efectuar la excavación de un panel, en seguida se coloca el armado en la trinchera llena de lodo previamente tratado para limitar las partículas de terreno en suspensión, y por último, se vacía el concreto con ayuda de la tubería tipo tremie.

Las juntas entre los paneles deben de ser tratadas cuidadosamente. Puede hacerse mediante la colocación de una junta de estanqueidad entre los paneles y el guiado de la herramienta de excavación.

### **Pantallas de tablestacas y técnicas derivadas.**

Este tipo de pantalla está constituida por tablestacas metálicas. De acuerdo al tipo de suelo, estas pueden ser colocadas mediante percusiones o vibración estática y ser conectadas entre ellas unas con otras.



**Figura 22.** Configuración tablestacas. (CIMESA, 2012).

Si se logra tener una interconexión entre las tablestacas de manera correcta, estas pueden ser muy eficientes al momento de prevenir las filtraciones. Cuando se trabaja en suelos altamente cohesivos, la baja permeabilidad de estas pantallas no es tan fundamental. Sin embargo, al trabajar en suelos granulares, una fuga dentro de la pantalla puede generar grandes asentamientos, y si estas son muy grandes, la estabilidad de la excavación puede estar en peligro.

### **Pantallas discontinuas.**

Las pantallas discontinuas están compuestas por elementos de cimentaciones profundas y elementos de blindaje (Tabla 5).

Los elementos de cimentaciones profundas en general se encuentran espaciados y se colocan previo a la excavación. Funcionan como estructuras rígidas verticales.

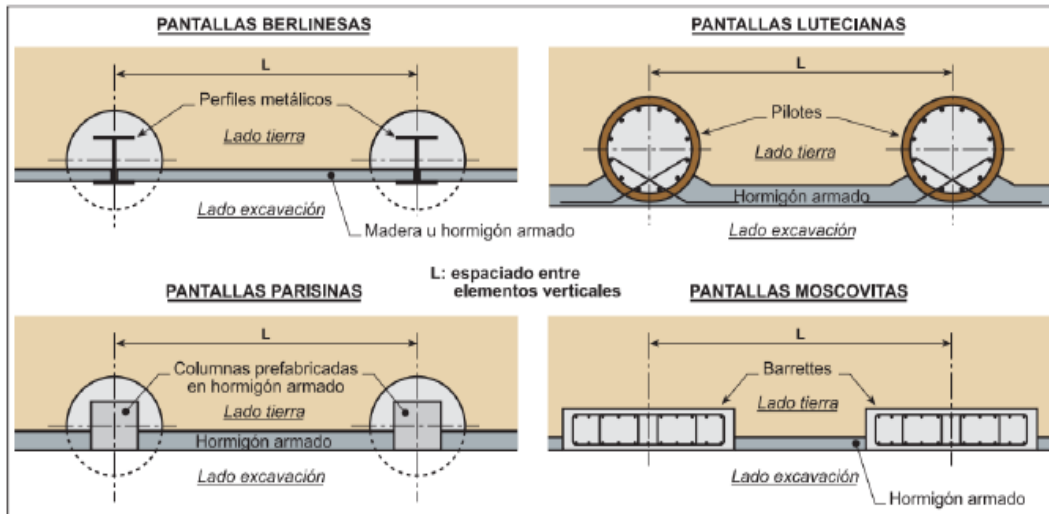
Los elementos de blindaje son quienes retienen el suelo apoyándose sobre las estructuras rígidas verticales. Estos elementos se colocan conforme vaya descendiendo el nivel de excavación.

Este tipo de pantallas implica que exista un control sobre la alimentación de agua significativa y que el suelo tenga la capacidad suficiente para autosostenerse verticalmente previo a la colocación del blindaje.

En la Figura 23 se realiza una comparativa entre los distintos tipos de armados para muros de retención discontinuos.

**Tabla 5.** Composición de pantallas de retención discontinuas. (CIMESA, 2012).

<b>Denominación</b>	<b>Elementos verticales</b>	<b>Blindaje</b>
Pantalla berlinesa	Perfiles metálicos	Madera o concreto lanzado o encofrado
Pantalla luteciana	Pilotes perforados	Concreto lanzado o encofrado
Pantalla parisisna	Pilotes prefabricados	Concreto lanzado o encofrado
Pantalla moscovita	Barrettes (elementos de muro pantalla)	Concreto lanzado o encofrado



**Figura 23.** Configuración armado de pantallas de retención. (CIMESA, 2012).

### 3.2 Factores que influyen en la selección del método de excavación.

Siempre que se inicia una excavación, se rompe el equilibrio que existe entre el sistema de fuerzas o tensiones presentes en el suelo. Por ejemplo, si realizamos la excavación en arena seca, los granos de las paredes deslizan hacia el fondo y este desplazamiento se detiene cuando se consigue un cierto ángulo de talud natural. Este ángulo es independiente de la altura del talud, ya que la arena es un suelo sin cohesión. Si realizamos la misma operación en una arcilla, podemos obtener una cierta profundidad con paredes casi verticales. En este caso, podríamos ver que el ángulo de talud natural varía con la altura, ya que la arcilla tiene mayor cohesión.

De acuerdo a lo anterior, son diversos los factores que nos conducen a elegir el método de excavación y de retención más conveniente para la ejecución de un proyecto, entre los cuales podemos destacar: las propiedades del suelo en el que se desea excavar, el área del sitio de excavación, las condiciones geológicas, la distribución de presiones del agua, las características de las edificaciones colindantes, las condiciones climatológicas, la seguridad estructural de los taludes, la estanqueidad de la excavación, los rendimientos y costos de ejecución.

Para la selección del mejor método de excavación se realizan todos los análisis y estudios necesarios, con la finalidad de tener la información más precisa sobre la ejecución del proyecto que se llevará a cabo; además, la experiencia previa en obras similares también es un factor fundamental en la toma de decisiones.



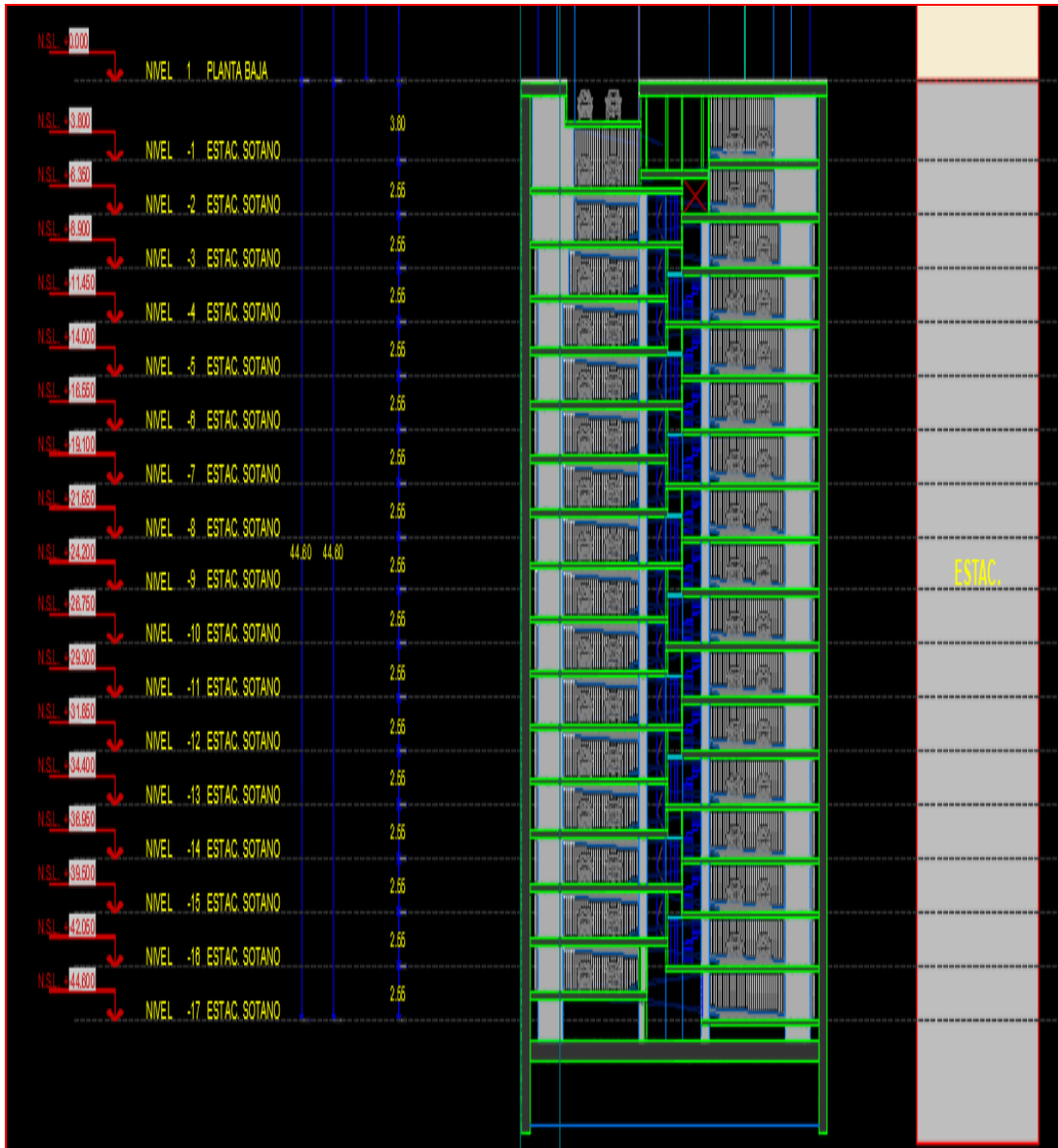
Durante la etapa de planeación del proyecto, con base en todos los análisis realizados, se optó por la excavación a cielo abierto ademada por medio de muro Milán circular autoestable, debido a los satisfactorios resultados obtenidos durante los cálculos estructurales realizados y las ventajas que presenta como proceso constructivo, siendo las principales: eficiencia en sitios donde el área para su ejecución es reducida, garantiza la estanqueidad de la excavación, el muro Milán cumple las funciones de sistema de retención y forma parte de la cimentación, ofrece buenos rendimientos, no requiere maquinaria especializada, se realizan pocas maniobras durante su ejecución, la construcción de los paneles se realiza antes de iniciar la excavación y no requiere más que lodo de perforación para la estabilidad de la excavación.

### **3.3 Estabilización de una excavación circular.**

La construcción de edificaciones con varios niveles de sótanos, en zonas urbanas en donde los suelos son blandos, implica la ejecución de excavaciones cada vez más difíciles. El valor que poseen los terrenos justifica el empleo de procesos especiales que garanticen la seguridad de las excavaciones. Dentro de estos procesos, el muro colado in situ ocupa una posición primordial.

Para contar con los detalles finales y tener el proyecto definitivo de esta obra, se realizó un exhaustivo análisis sobre las propuestas planteadas para su ejecución, dentro de todas ellas se optó por la excavación circular autoestable. El término autoestable se da por no contar con ningún tipo de refuerzo o arriostramiento en su estructura, es decir, el muro pantalla trabaja por sí solo, de manera similar a la de un anillo, lo cual hace que este sea un elemento rígido, altamente resistente, evita las deformaciones causadas por los empujes de la masa de suelo y restringe la entrada de agua al interior de la excavación.

Entre los beneficios que otorga este sistema podemos destacar: la continuidad, la estanqueidad, la resistencia y el procedimiento poco ruidoso durante su ejecución. A pesar de que en un principio el objetivo de un muro pantalla es contener e impermeabilizar la excavación, también soporta las cargas verticales que pueden transmitir otros elementos estructurales, y constituye una solución eficaz para limitar los movimientos del terreno consecuentes a toda la excavación y reducir el riesgo de daños a las construcciones próximas, los cuales también pueden ser disminuidos con el empleo en forma complementaria de tratamientos basados en jet grouting (Celma et al, 1996).



**Figura 24.** Plano Arquitectónico de sótanos del proyecto inmobiliario. (CIMESA 2018).

Para los trabajos iniciales referentes a la estabilidad de una excavación circular sin ningún tipo de refuerzo o arriostramiento que evite la deformación y resista los empujes del suelo, primeramente debemos cerciorarnos de que el suelo no contenga cavernas; para este proyecto en particular, y debido a que el suelo en el que se va a trabajar es poco competente, se recurrió a una solución mediante un proceso de mejoramiento llamado "inyección de suelos", esto con base en los estudios de mecánica de suelos realizados.

La inyección de suelos es un procedimiento que consiste en la inyección controlada de lechadas auto-fraguantes o de productos químicos, que impedirán el

paso del agua a través de las fracturas o vacíos del suelo, o que incrementarán la resistencia al esfuerzo cortante en posibles superficies de falla. Esta inyección puede aplicarse tanto a suelos como a estructuras existentes. La entrada de agua inesperada y las pobres condiciones del terreno durante la excavación suelen aumentar los costos, afectar negativamente al medio ambiente e, inevitablemente, causar retrasos significativos. Para contrarrestar estos riesgos, una opción económica y efectiva consiste en inyectar el terreno por el frente de excavación, con el fin de evitar la entrada de agua y estabilizar el terreno.

Posterior a esto, se realiza la estabilidad mediante el uso de lodos bentoníticos introducidos durante la excavación de la lumbrera, los cuales forman en sus paredes una costra o “cake” como consecuencia de la pérdida local de agua que sufren, se forma así una especie de membrana de muy baja permeabilidad que permite el desarrollo y aplicación de la presión del fluido estabilizador a las paredes de la excavación. En las arcillas de la Ciudad de México cuando se excava la lumbrera solo con agua, las maniobras de operación de las almejas forman de manera espontánea un lodo arcilloso que también es capaz de formar costra como en los lodos bentoníticos.

Es evidente que en las arenas permeables se requiere un lodo viscoso y que solo con bentonita, e incluso aditivos, se puede lograr la costra; en cambio, en arcillas y arenas con porcentajes significativos de arcilla, un lodo de baja viscosidad es suficiente, ya que en las paredes de la excavación necesariamente queda untada una capa de arcilla remoldeada por la almeja de excavación, la cual funciona como una excelente costra estabilizadora, que además es complementada en los eventuales estratos arenosos con los coloides del lodo arcilloso. El lodo genera una presión hidrostática que se opone a la generación de la superficie de falla que corresponde al estado activo de empuje de la masa de suelo.

El proyecto en general requiere la construcción de 17.5 sótanos para alojar a los estacionamientos que darán servicio al edificio, para lo cual se considera una lumbrera de 35.10 m de diámetro interior, retenida por muro Milán con espesor definitivo de 1.00 m hasta una profundidad de 48.10 m y la secuencia de excavación a cielo abierto (Figura 24). El Nivel de Piso Terminado (N.P.T.) de la losa de cimentación se ubica al nivel -45.60 m, sin embargo, considerando un espesor máximo de losa de fondo de 1.0 m más 5 cm de plantilla, el Nivel Máximo de Excavación (N.M.E.) se establece a -46.65 m. La cimentación del inmueble será resuelta, además de lo anterior, con Barrettes de 1.0 m de espesor desplantadas a 74.0 m de profundidad. Para mayor seguridad y mejor empotramiento con los estratos duros del suelo, se contempla desplantarlas 3.0 m más abajo, es decir, a los 77.0 m.

Las etapas constructivas consideradas en los análisis para la estabilización de la excavación circular son:

- Condiciones iniciales. Construcción del muro Milán circular y construcción de las Barrettes interiores.
- Excavación a la -2.00 m en toda la lumbrera, con abatimiento del agua en el interior de la misma a la -5.00 m.
- Construcción de la Trabe de Coronamiento 100x200cm en toda la lumbrera.
- Excavación hasta el nivel máximo de excavación (N.M.E.) -46.65 m en toda la lumbrera, con abatimiento del agua en el interior de la lumbrera a la -49.65 m.
- Construcción de losa de fondo de 1.00 m de espesor.
- Fluencia, reducción del módulo de elasticidad del concreto a  $1.3E6 \text{ t/m}^2$ .

A continuación se muestran los análisis y modelos realizados para la ejecución de la excavación y el método de retención.

### 3.4 Análisis de muro Milán estructural circular.

En un muro Milán estructural circular la definición del espesor efectivo depende de dos factores, la geometría real del arreglo de los paneles, el cual origina una reducción del espesor real considerando en el diseño el anillo inscrito (promedio de máximos y mínimos del esfuerzo a compresión por efecto de geometría) y la desviación con la vertical por proceso constructivo (mínimo espesor de muro en el contacto entre paneles para máximo esfuerzo a compresión). La estructura circular del muro es una estructura muy rígida, lo suficiente para que los desplazamientos horizontales sean de poca importancia, esto genera que los empujes laterales actuantes sobre el muro en etapas de construcción y servicio sean los debidos a una condición de reposo más los del agua considerando una distribución piezométrica. Definido el espesor efectivo de muro = Real – efecto anillo inscrito - desviación con la vertical, se revisan los esfuerzos en el concreto para evitar el aplastamiento del mismo.

Con base en la estratigrafía de análisis, así como en las condiciones piezométricas, se calcularon los diagramas de esfuerzos verticales, horizontales (en reposo) y de presión de poro mostrados en la Tabla 4.

El esfuerzo máximo de compresión ortoradial se calcula como:

$$\sigma = \frac{pr}{e} \dots\dots\dots (4.1)$$

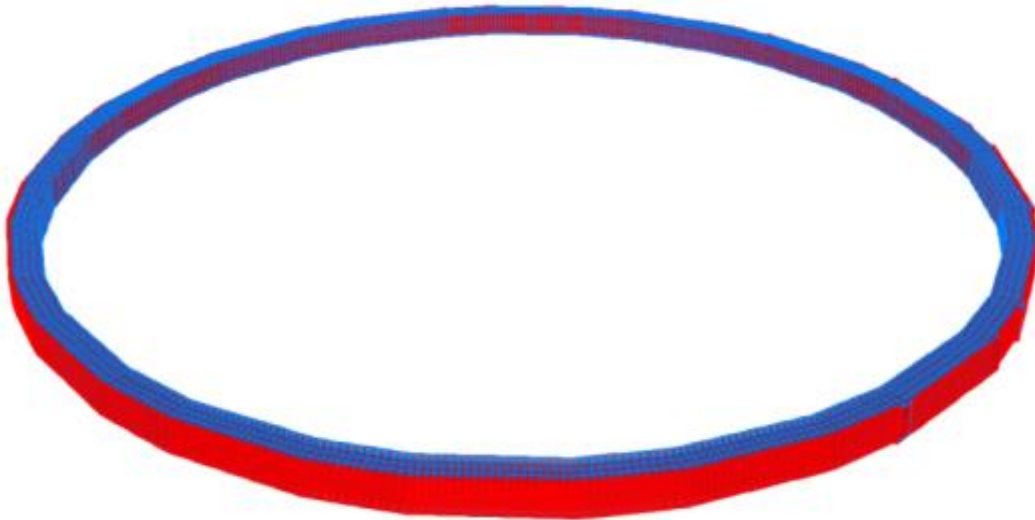
Donde

$p$ ; Presión máxima a 48.10 m de profundidad = 57.09 t/m<sup>2</sup>

$r$ ; Radio a la mitad del espesor del muro = 18.05 m

$e$ ; Espesor considerado del anillo

Con base en la distribución de paneles representada en los planos CIM-ING-UNT-PLA02 (revisar anexos), se modeló la geometría real del anillo para evaluar la distribución de los esfuerzos a compresión. El modelo se realizó con el programa SAP2000.



**Figura 25.** Vista tridimensional del modelo del anillo, considerando 1.0 m de espesor y un estado plano de deformación.

El modelo consiste en elementos tipo “Shell” de 1.0 m de espesor y una trabe ficticia perimetral (de 0.1 m x 1.0 m), como elemento tipo “Frame”, la cual no está habilitada para tomar ningún elemento mecánico, simplemente para facilitar la aplicación de las cargas. Los análisis se realizaron con la geometría teórica de la lumbrera, de acuerdo con la distribución de paneles propuesta (ver plano CIM-ING-UNT-PLA02).

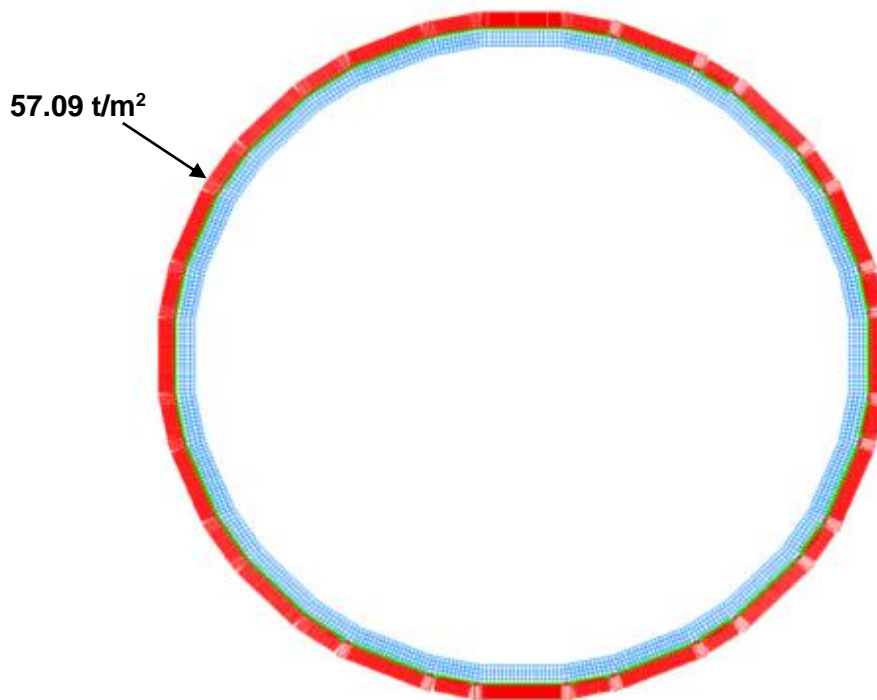
Todos los elementos tipo “Shell” tienen las propiedades de rigidez y peso volumétrico que corresponden a un concreto de resistencia  $f'c$  de 400 kg/cm<sup>2</sup> a los

28 días; es decir, que se tiene un módulo de elasticidad, en  $\text{kg/cm}^2$ , de  $E=14000\sqrt{f'c}$  (NTC-Concreto). Por tratarse de un análisis plano, no se considera el peso propio.

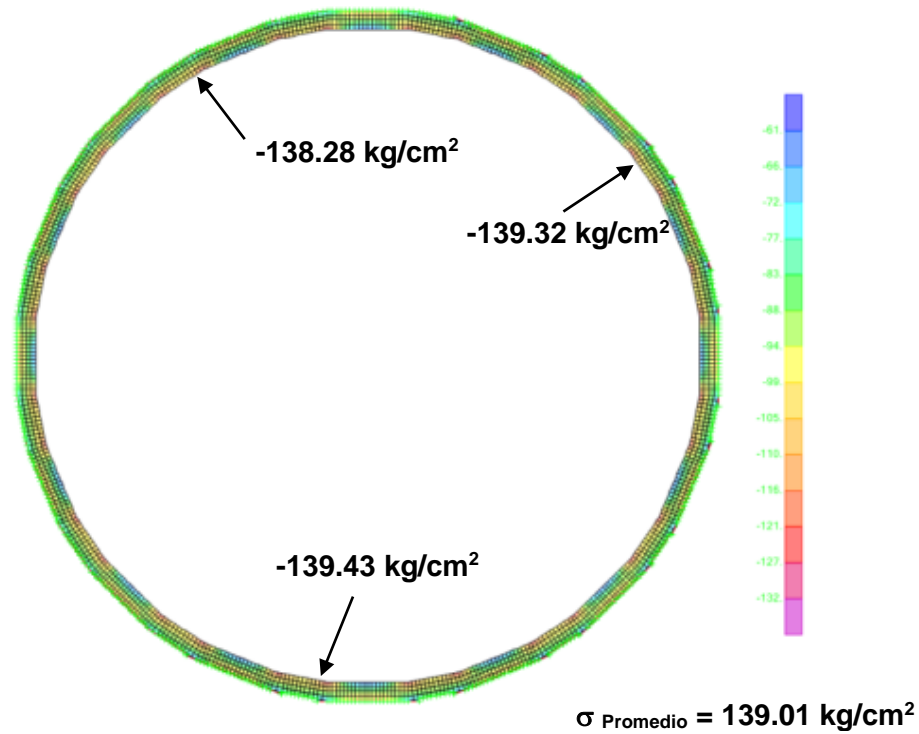
El modelo tridimensional posee 3 grados de libertad de movimiento (X, Y y Rz).

Las cargas correspondientes a las presiones de poro y al esfuerzo horizontal efectivo del suelo ( $57.09 \text{ t/m}^2$ ), se aplican, en forma de carga uniforme distribuida, sobre los elementos ficticios tipo "Frame", en dirección ortogonal al eje del "Frame", con sentido hacia el interior de la lumbrera.

Del modelo se obtienen finalmente los desplazamientos horizontales debidos a los empujes totales del suelo, así como los esfuerzos en el concreto y cortante en la pared de la lumbrera.



**Figura 26.** Vista en planta del anillo con la carga uniforme de  $57.09 \text{ t/m}^2$  en el perímetro exterior.



**Figura 27.** Distribución de esfuerzos a compresión en el anillo real.

Considerando una geometría perfecta de anillo (1.0 m de espesor), el esfuerzo a compresión con base en la ecuación sería:

$$\sigma = \frac{57.09(18.05)}{1.0} = 1030.47 \text{ t/m}^2$$

Para un muro de 1.0 m de espesor, 35.10 m de diámetro interno, el anillo inscrito es de 5.02 cm, considerando que la desviación máxima con la vertical teniendo en cuenta la instrumentación del equipo de perforación y el proceso constructivo es de 0.5% parcial y 1.0% total, a 48.10 m de profundidad tenemos una reducción de espesor de 22.0 cm, por tanto, el espesor de diseño será el espesor del anillo inscrito menos la desviación total con la vertical (100 cm – 5.02 cm – 38.48 cm = 56.3 cm). Sustituyendo en la ecuación, tenemos:

$$\sigma = \frac{57.09(18.05)}{0.563} = 1830.32 \text{ t/m}^2$$

Con base en los resultados de los análisis de la sección transversal con elementos finitos (SAP2000), el máximo esfuerzo a compresión del anillo teniendo en cuenta la geometría real por la distribución de los paneles es de -138.28 kg/cm<sup>2</sup> y el promedio de -139.42 kg/cm<sup>2</sup>.

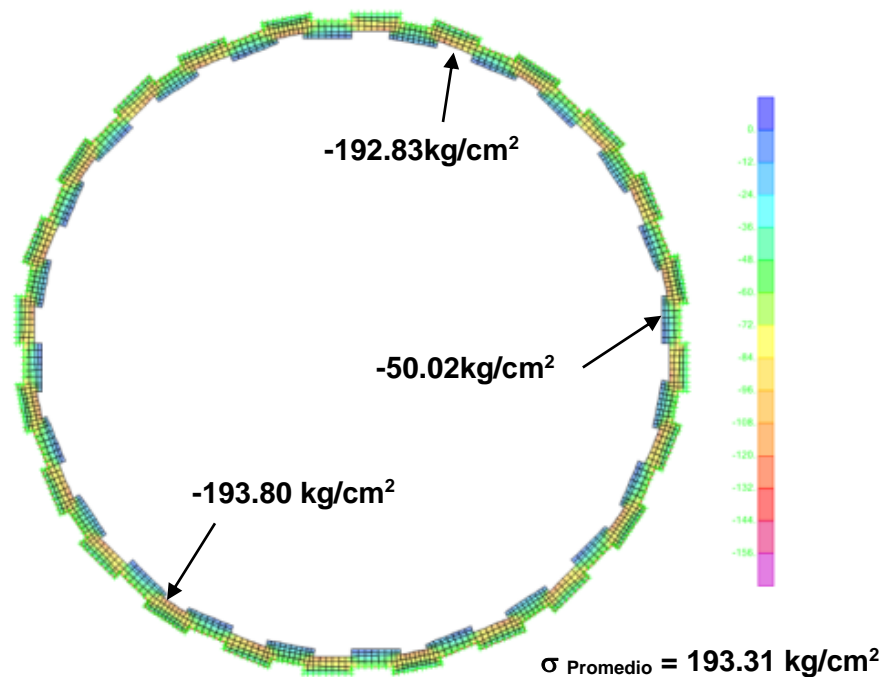
Cabe señalar que no se presentan esfuerzos de tensión, por lo que puede afirmarse que el trabajo de la estructura es como anillo a compresión.

Con base en el Reglamento de Construcciones de la Ciudad de México y sus Normas Técnicas Complementarias, el esfuerzo a compresión máximo es de  $200.6 \text{ kg/cm}^2$  (ver Tabla 6).

**Tabla 6.** Esfuerzos admisibles por aplastamiento en el concreto.

FC	FR	FS=FC/FR	1/FS	$f^*c$ (aplastamiento)		$f'c = 400$ $\text{kg/cm}^2$
1.1	0.65	1.69	0.59	$.85f'c$	$=0.59 \cdot 0.85f'c = 0.50f'c$	$200.6 \text{ kg/cm}^2$

Adicionalmente y para confirmar los resultados y criterios antes expuestos, se realizó un nuevo modelo con el programa SAP2000, donde se modeló la geometría real del anillo, pero ahora considerando la condición más crítica y desfavorable en que cada una de las “mordidas” del equipo de excavación presentara una desviación de 0.4% hacia un sentido y la “mordida” siguiente también una desviación de 0.4% pero en sentido contrario, para tener una desviación total de 0.8%. Nuevamente se aplicó la presión máxima esperada y se obtuvieron los siguientes resultados:



**Figura 28.** Distribución de esfuerzos a compresión en el anillo real considerando máxima desviación de 0.8% entre cada “mordida” de muro Milán.



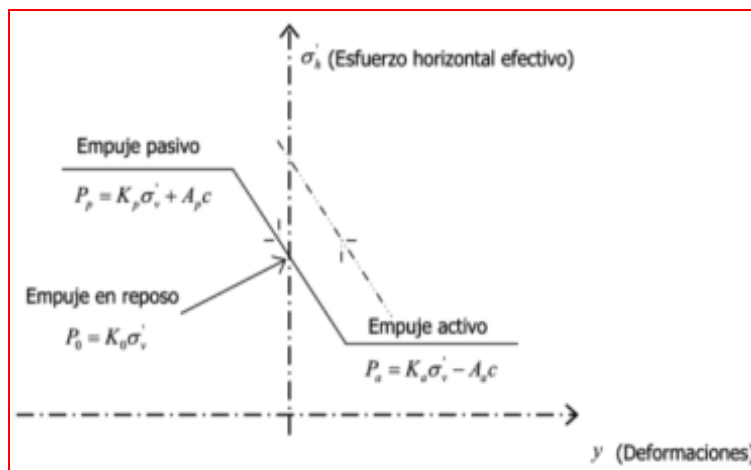
$193.31 \text{ kg/cm}^2 < 200.6 \text{ kg/cm}^2$ , por tanto, el espesor de 1.0 m cumple con la revisión por aplastamiento.

Como puede observarse, el esfuerzo máximo calculado con el modelo de SAP2000 es aproximadamente el mismo que se calculó de forma teórica para la condición más crítica de anillo inscrito más la máxima desviación de 0.8%, es decir,  $200.6 \text{ kg/cm}^2$ .

### 3.4.1 Análisis de muro Milán con Programa PARIS.

El análisis de la secuencia de construcción se realizó mediante el programa PARIS desarrollado por el Grupo Soletanche-Bachy, versión W2011m, basado en el Método del Módulo de Reacción, este programa considera al muro como una yuxtaposición de trabes verticales solicitadas por empujes laterales de tierras (reposo, activo y pasivo), por sobrecargas, así como por el empuje hidrostático del agua (o con el abatimiento respectivo si es el caso), con el cual, adicionalmente, se determinaron los elementos mecánicos para el diseño estructural del muro. Dicho programa permite la simulación de las fases del procedimiento constructivo, así como la interacción suelo-estructura y el comportamiento elasto-plástico del terreno.

El programa PARIS modela a los suelos como un medio elasto-plástico obedeciendo a las hipótesis de Winckler, conforme al esquema siguiente.



**Figura 29.** Comportamiento Esfuerzo-Deformación utilizado en el modelo de análisis.

Para el cálculo de desplazamientos laterales del muro Milán, el suelo se modeló a través del coeficiente de reacción  $K_s$ .

Los valores de  $K_0$  fueron estimados, de manera conservadora y práctica, como  $\nu/(1-\nu)$ .

Los valores de los coeficientes de empuje activo-pasivo (Caquot & Kérisel) tienen en cuenta la oblicuidad de fuerza igual a cero en activo e igual a  $-2/3\phi$  en pasivo.

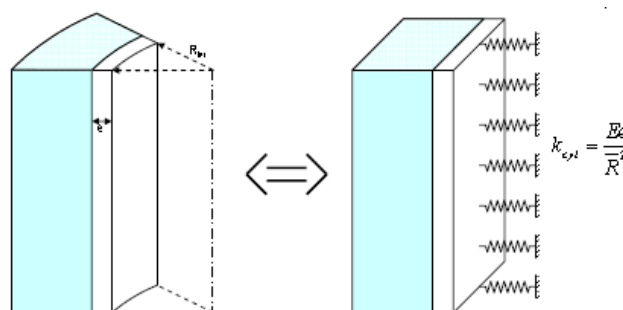
Las etapas constructivas consideradas en los análisis son:

- Condiciones iniciales. Construcción del muro Milán circular y construcción de las Barrettes interiores.
- Excavación a la -2.0 m en toda la lumbrera, con abatimiento del agua en el interior de la lumbrera a la -5.0 m.
- Construcción de la Trabe de Coronamiento 1.0x2.0 m en toda la lumbrera.
- Excavación hasta el Nivel Máximo de Excavación (N.M.E.) -46.65 m en toda la lumbrera, con abatimiento del agua en el interior de la misma a la -49.65 m.
- Construcción de losa de fondo de 1.00 m de espesor.
- Fluencia, reducción del módulo de elasticidad del concreto a  $1.3E6$  t/m<sup>2</sup>.

Las sobrecargas en el respaldo del muro Milán, considerada en los análisis fue de  $2.0$  t/m<sup>2</sup> en la superficie del terreno.

### Caso 1. Muro Circular con espesor real y espesor reducido.

Considerando que es un muro circular, a toda deformación radial hacia el interior de la excavación se opone la generación de un esfuerzo ortoradial en la pared, por tanto, un muro circular puede calcularse como una pantalla plana a la que se añade un apoyo horizontal elástico de rigidez  $k_{cyl}$ . Dicha rigidez cilíndrica se calcula como:  $k_{cyl} = Ee/R^2$ , donde,  $E$  es el módulo de elasticidad, “ $e$ ” es el espesor de diseño (anillo inscrito-desviación con la vertical) por tratarse de una condición conservadora para este cálculo y  $R$  es el radio medio del anillo.



**Figura 30.** Hipótesis de análisis para representar la rigidez cilíndrica.

Para este proyecto tenemos dos análisis, uno con espesor reducido del muro Milán (0.563 m) y uno con espesor constante (1.0 m):

$$E = 2.8 \times 10^6 \text{ t/m}^2$$

$$e = 0.563 \text{ m}$$

$$R = 18.05 \text{ m}$$

$$\text{Por tanto, } k_{\text{cyl}} = 4,838.51 \text{ t/m}^3$$

Para el muro con espesor real tenemos:

$$E = 2.80 \times 10^6 \text{ t/m}^2$$

$$e = 1.0 \text{ m}$$

$$R = 18.05 \text{ m}$$

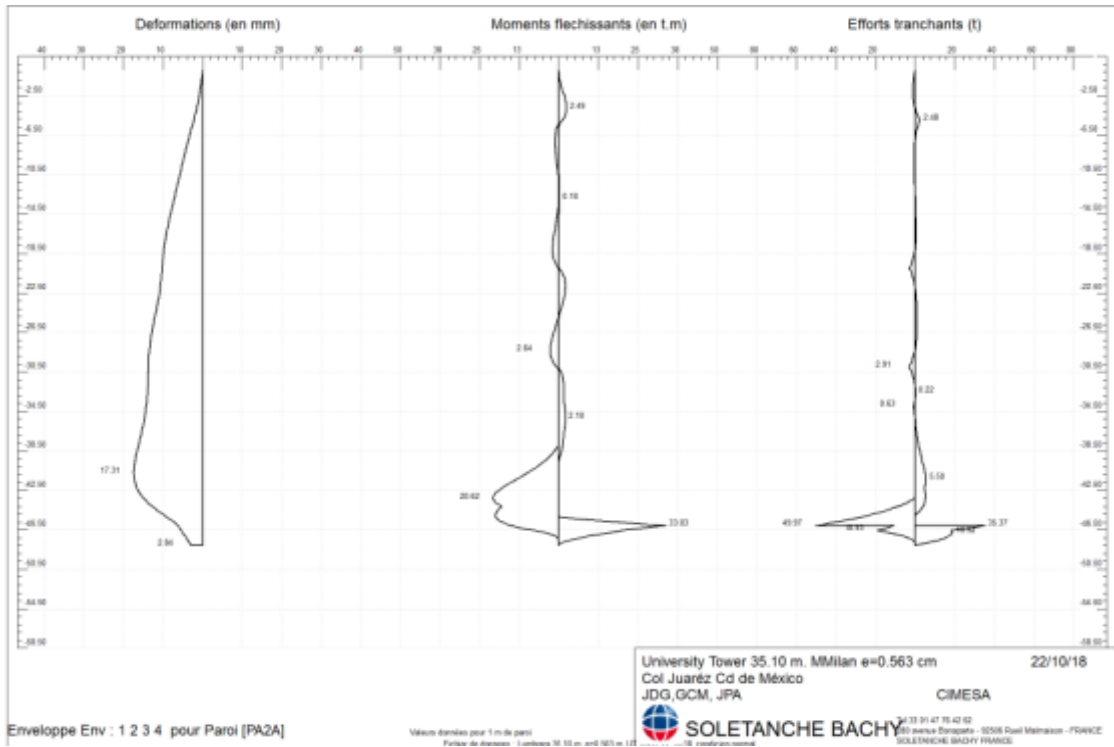
$$\text{Por tanto, } k_{\text{cyl}} = 8,594.16 \text{ t/m}^3$$

Con el fin de estimar los elementos mecánicos máximos que pudieran presentarse, se consideró, para el cálculo de la rigidez propia del muro Milán un espesor de 1.0 m, por tanto,  $k_{\text{cyl}} = 8,594.16 \text{ t/m}^3$ . Esto porque a mayor rigidez, menos deformación y más elementos mecánicos.

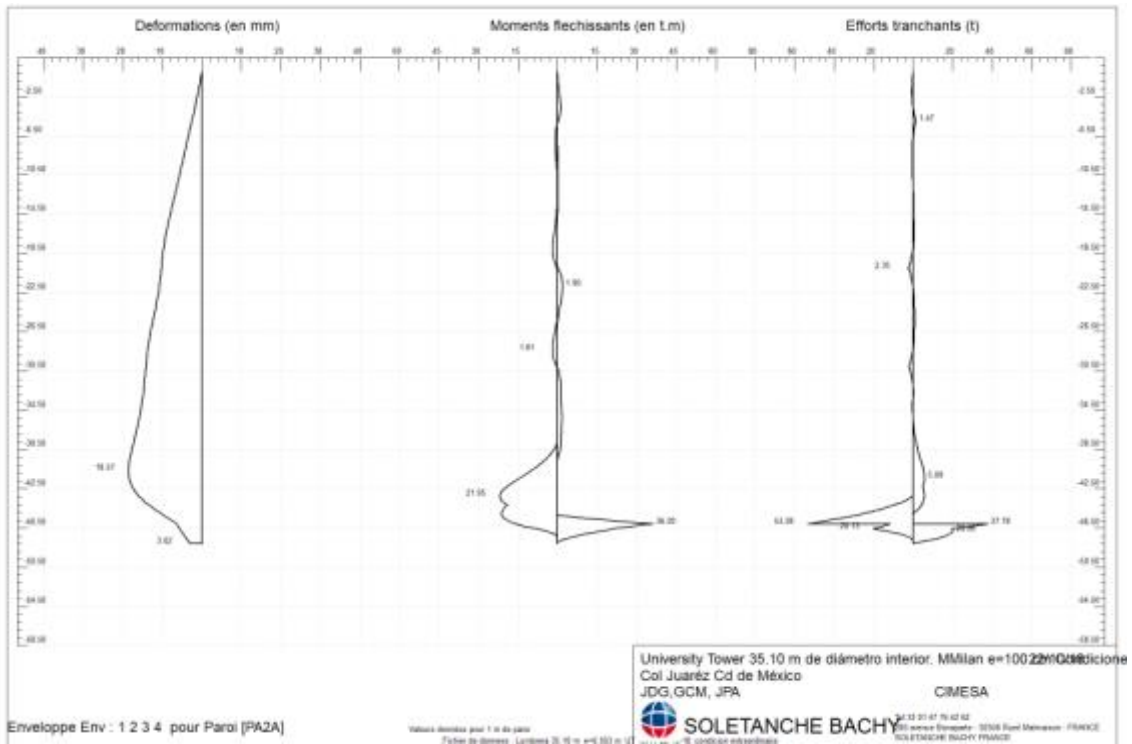
Los análisis se realizan para un ancho unitario de muro, por tanto, los elementos mecánicos también son por unidad de longitud. Los resultados no están factorizados, son elementos mecánicos en servicio.

Se realizaron dos análisis, uno para la condición normal y otro para la condición extraordinaria.

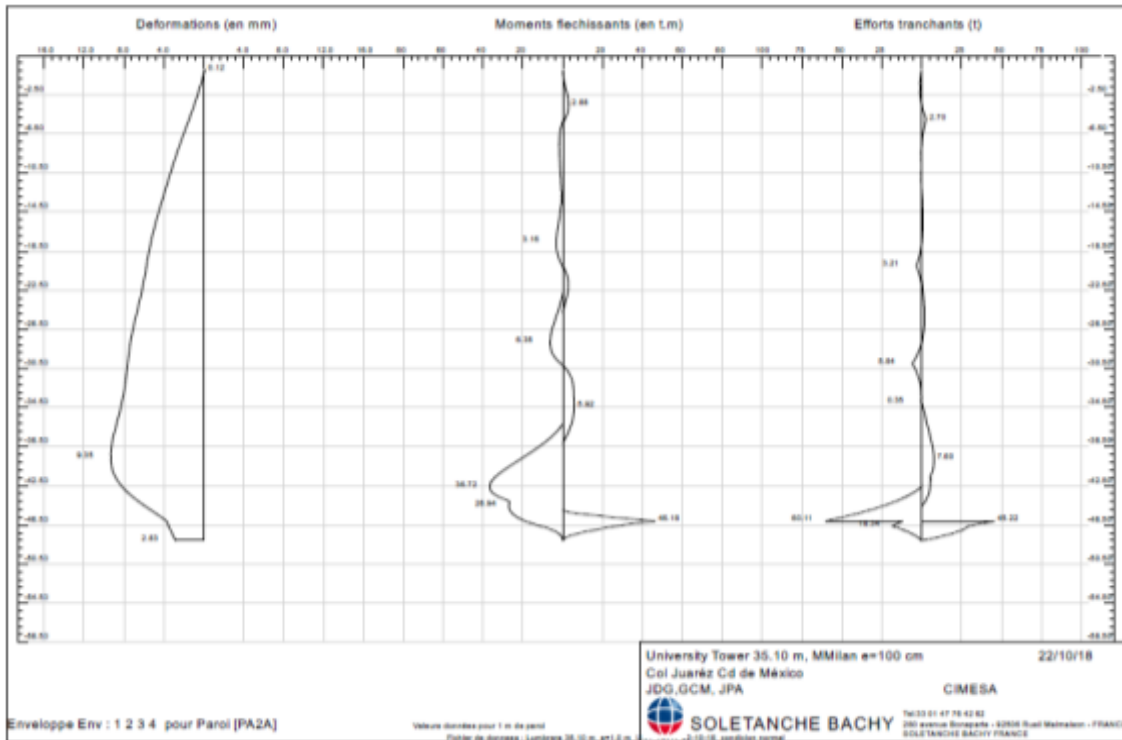
A continuación, se presenta la envolvente de elementos mecánicos en el muro Milán desplantado a -48.10 m para la condición antes mencionada, es decir, condición normal y condición extraordinaria.



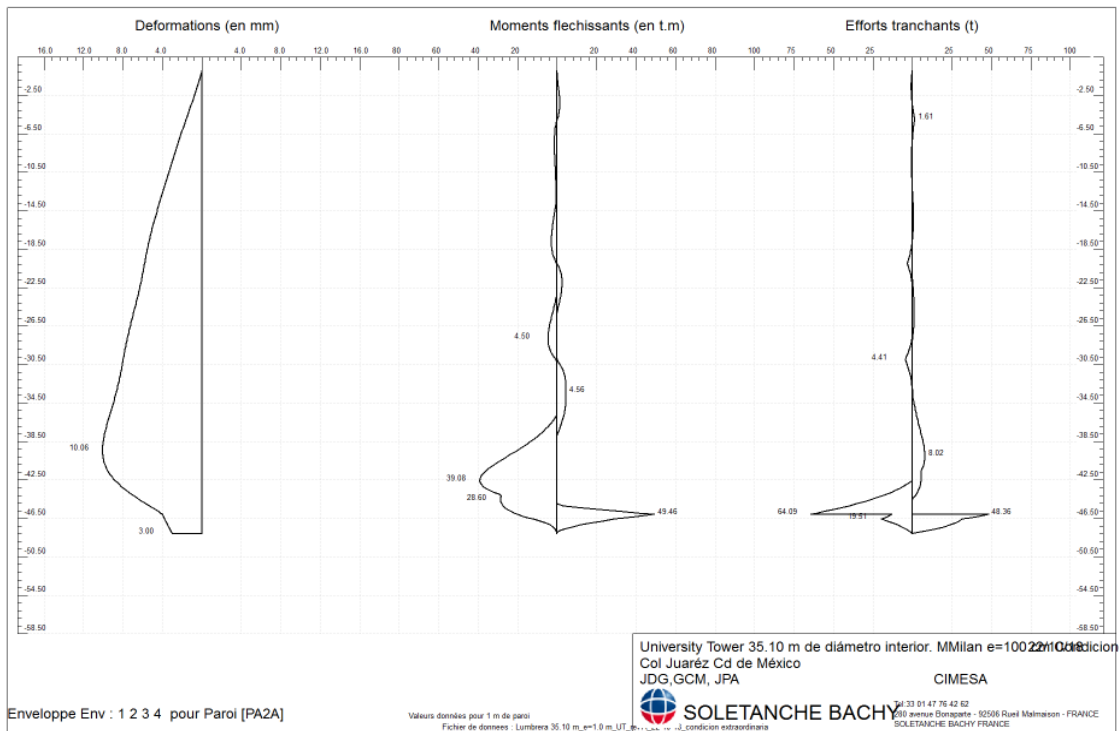
**Figura 31.** Envolvente de desplazamientos y elementos mecánicos. Condición normal, muro Circular  $e=0.563$  m, desplantado a  $-48.10$  m.



**Figura 32.** Envolvente de desplazamientos y elementos mecánicos. Condición extraordinaria, muro Circular  $e=0.563$  m, desplantado a  $-48.10$  m.

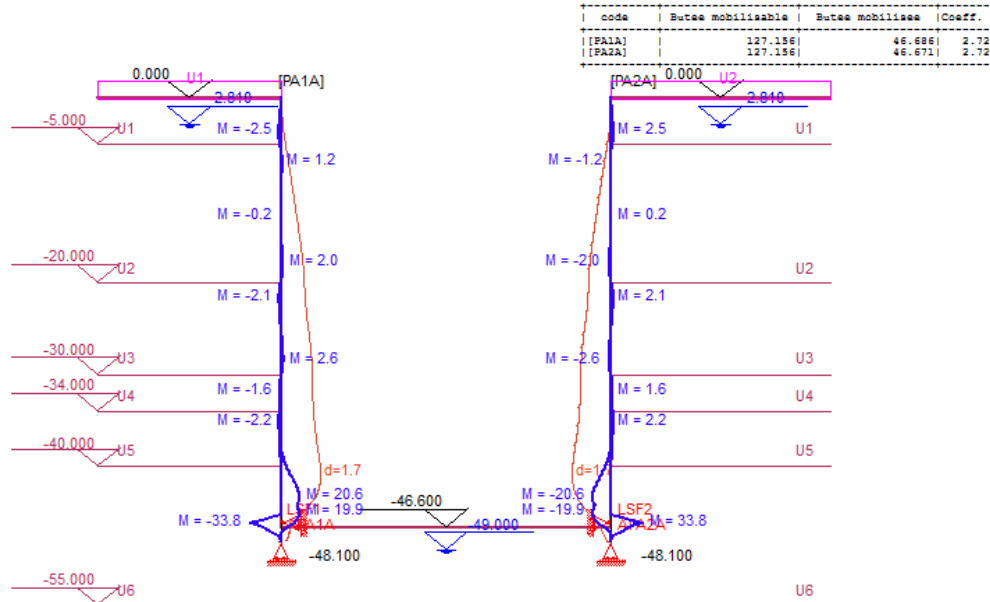


**Figura 33.** Envolvente de desplazamientos y elementos mecánicos. Condición normal, muro Circular  $e=1.00$  m, desplantado a  $-48.10$  m.

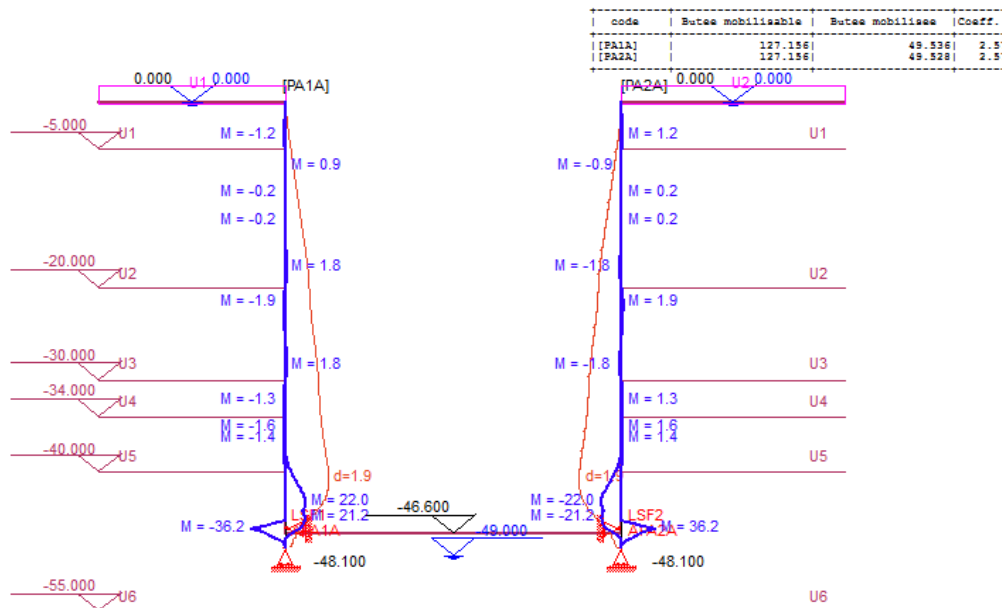


**Figura 34.** Envolvente de desplazamientos y elementos mecánicos. Condición extraordinaria, muro Circular  $e=1.00$  m, desplantado a  $-48.10$  m.

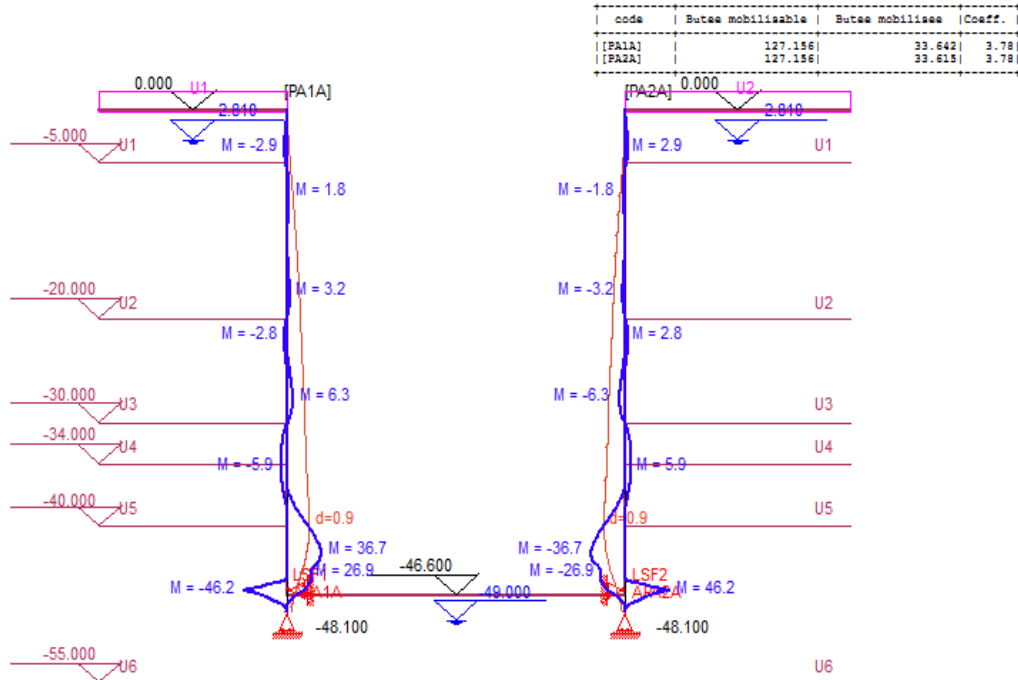
De acuerdo con los análisis realizados, en los que se consideró un nivel de desplante del muro Milán en la cota -48.10 m, es decir, aproximadamente 1.50 m por debajo del nivel máximo de excavación, se obtuvo un factor de seguridad mínimo ante falla por pateo del muro de 2.52 lo cual es satisfactorio (ver Figura 35, 36, 37 y 38).



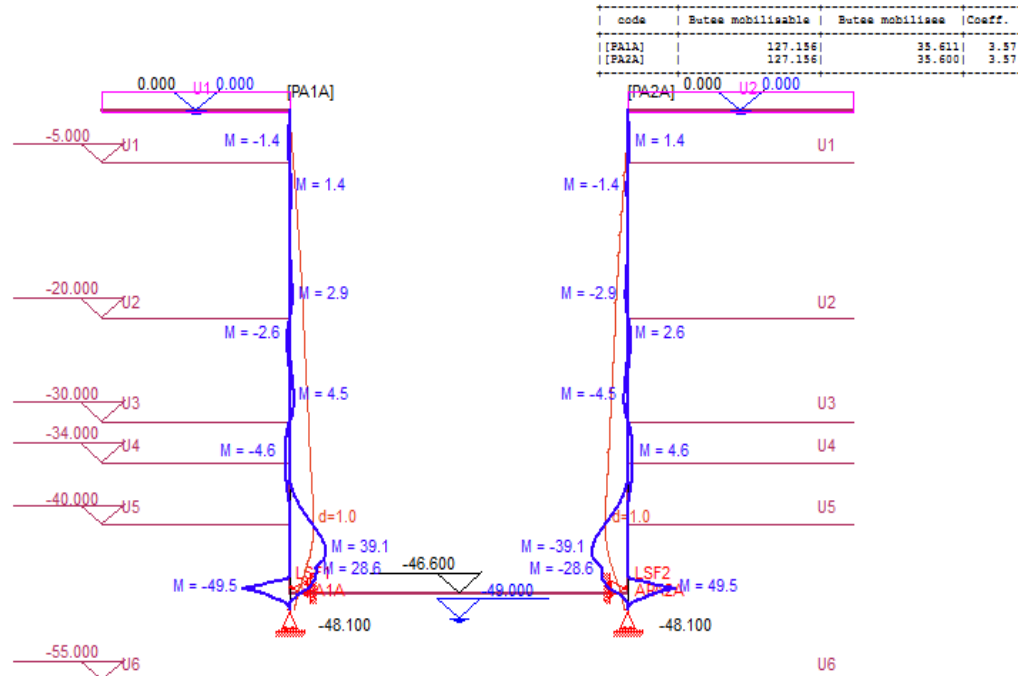
**Figura 35.** Factores de Seguridad obtenidos del análisis, ante falla por pateo del muro Milán, muro Circular  $e=0.563$  m, condición normal.



**Figura 36.** Factores de Seguridad obtenidos del análisis, ante falla por pateo del muro Milán, muro Circular  $e=0.563$  m, condición extraordinaria.



**Figura 37.** Factores de Seguridad obtenidos del análisis, ante falla por pateo del muro Milán, muro Circular  $e=1.0$  m, condición normal.



**Figura 38.** Factores de Seguridad obtenidos del análisis, ante falla por pateo del muro Milán, muro Circular  $e=1.00$  m, condición extraordinaria.

Los factores de seguridad ante la falla por pateo del muro para todos los tipos y para condiciones normales y extraordinarias se muestran en la Tabla 7.

**Tabla 7.** Factores de seguridad ante falla por pateo de muro.

Tipo de Muro	Factor de seguridad	
	Condición normal	Condición extraordinaria
Muro Milán Circular, e=1.00m	3.78	3.57
Muro Milán Circular, e=0.563m	2.72	2.57

De acuerdo a los factores de seguridad obtenidos, se consideran satisfactorios para todos los casos de análisis.

Para verificar los resultados obtenidos con el programa PARIS se analizó la lumbrera con el programa SAP2000, con el cual se modeló tridimensionalmente a la estructura, mediante la formación de una malla de elementos finitos a la cual se les aplican las cargas correspondientes a los empujes del suelo y los piezométricos.

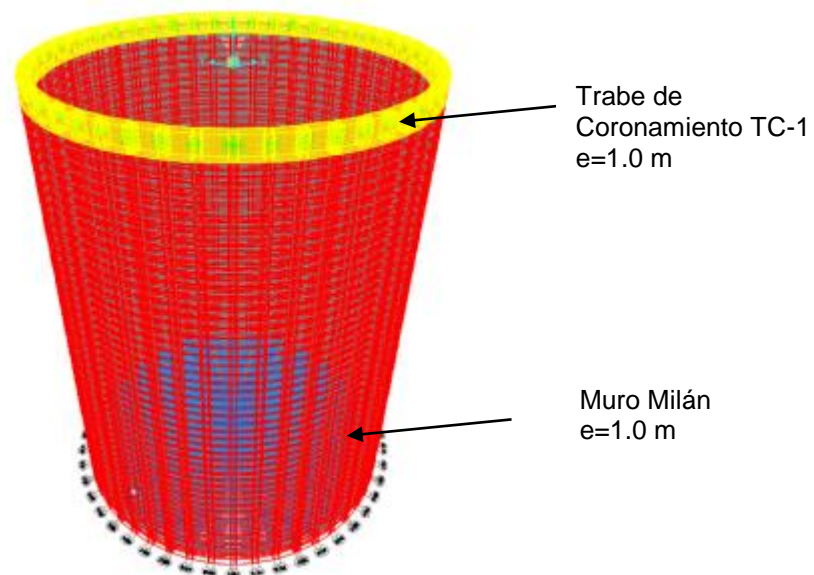
Los análisis se realizaron con la geometría teórica de la lumbrera, la cual corresponde a un cilindro hueco de 48.10 m de altura, 35.10 m de diámetro interno y 36.10 m de diámetro medidos al centro del espesor del muro de la lumbrera. En un primer modelo, el muro se compone de elementos finitos de 1.0x1.0m cuyo espesor varía con la altura de acuerdo a la desviación horizontal relativa que se presenta entre dos paneles de muro Milán durante su construcción. Esta desviación relativa es del 0.8%, por lo que entre dos paneles existirá una diferencia de espesor de 0.8 cm por cada metro de profundidad, de tal modo que el espesor a 0.00 m de profundidad corresponde al espesor total inscrita del muro que es de 100 cm y va disminuyendo hasta ser de 56.30 cm de espesor a 48.10 m de profundidad. Este modelo permite observar la condición más crítica en cuanto a deformaciones.

Adicionalmente se realizó un segundo modelo en el que el espesor del muro se mantiene constante, de 100 cm a toda la profundidad, esto para considerar la posibilidad de que la desviación sea menor a la máxima aceptable, con lo que el muro tendría mayor rigidez y por lo tanto absorbería mayores elementos mecánicos. Así pues, el modelo con espesor variable se considera para fines de deformaciones (incluyendo los efectos en trabe de coronamiento y trabe de rigidez) y el modelo con espesor constante se considera para fines de estimación de elementos mecánicos máximos.



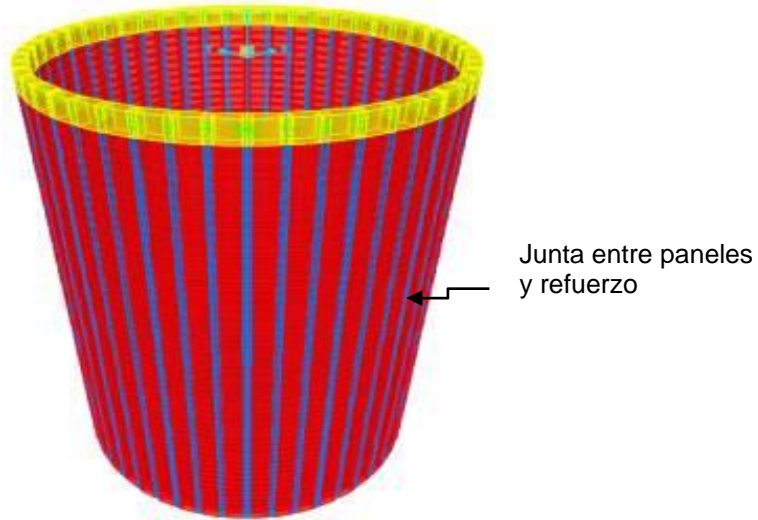
El análisis estructural de la lumbrera se realizó con un modelo matemático tridimensional llevado a cabo mediante la ayuda del programa comercial SAP2000 versión 20.1.0. Ultimate. Con este programa es posible realizar un modelo numérico del muro Milán simulándolo mediante una malla de elementos finitos tipo 'SHELL', y haciéndolo trabajar en conjunto con la trabe de coronamiento la cual es simulada a su vez mediante elementos prismáticos discretos tipo 'FRAME'. Se incluye también en el modelo una malla de elementos finitos tipo 'SHELL' que simula la losa de fondo.

El análisis tridimensional se realizó para una sola etapa de excavación que corresponde a la condición crítica de cargas y deformaciones en el muro y traveses. Esta etapa es aquella en la que ya se ha excavado al interior de la lumbrera y ya se han construido la trabe de coronamiento y la losa de fondo.

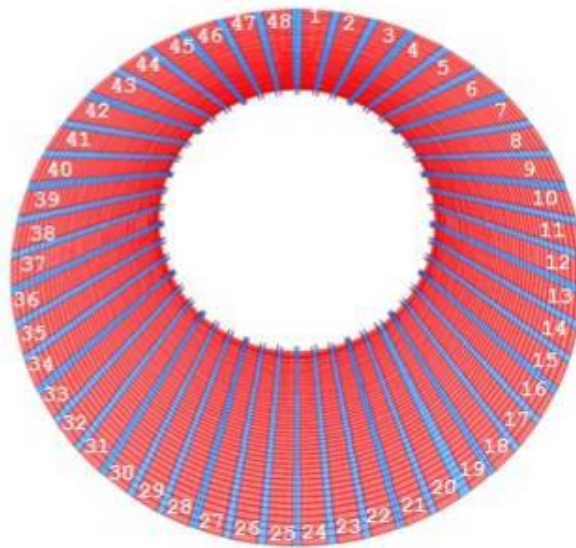


**Figura 39.** Modelo numérico de la lumbrera en SAP2000, versión v20.1.0. Ultimate.

Como parte del procedimiento constructivo, la pared de la lumbrera se colará en 16 tramos circulares (paneles de muro Milán), entre los cuales se colocará una junta impermeable (waterstop). Cada uno de estos tramos o paneles se armará con 3 jaulas de acero de refuerzo uniformemente distribuidas. Estructuralmente hablando, existe una discontinuidad horizontal entre cada jaula de acero y entre paneles de muro Milán, por tanto, esta zona discontinua es tomada en cuenta en el modelo tridimensional haciendo que los elementos finitos que corresponden a ella, donde el muro Milán tengan una rigidez nula a flexión horizontal  $m_{11}$ , logrando con ello la redistribución de esfuerzos que se presentará en la realidad.



**Figura 40.** Simulación de franjas de rigidez a flexión horizontal nula debida a la separación entre armados y juntas entre paneles.



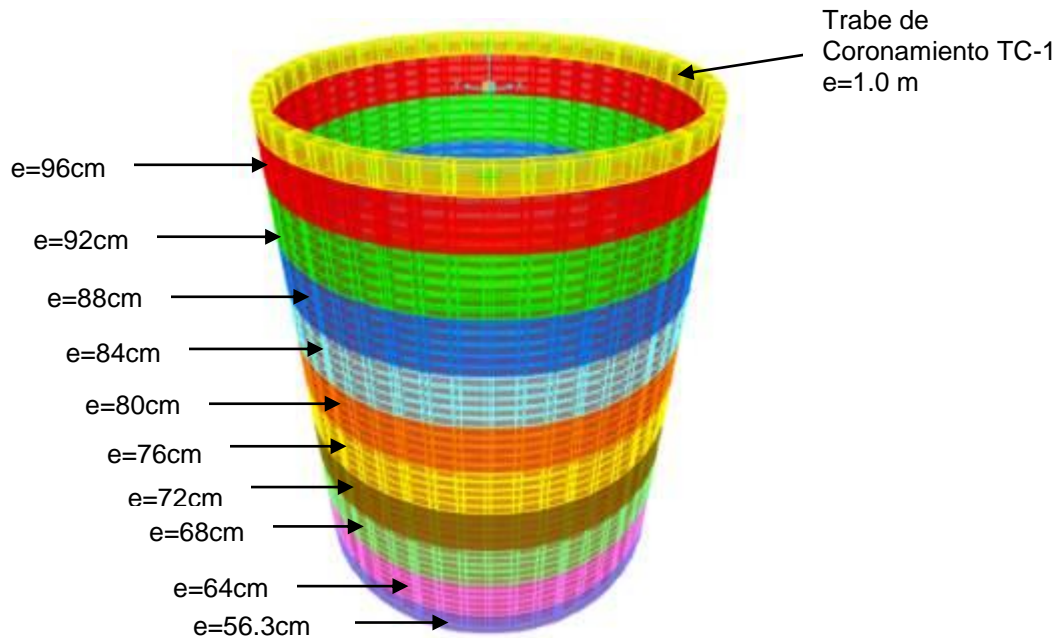
**Figura 41.** Distribución de armados en modelo tridimensional (ver plano CIM-ING-UNT-PLA02).

Las cargas fueron aplicadas como presión uniforme actuante sobre la cara exterior de los elementos tipo “Shell” del muro de acuerdo a dos condiciones de carga independientes: la presión efectiva del suelo y la presión de poro. Para cada condición de carga se aplicó una distribución de presiones variantes con la profundidad. Se define también, en el SAP2000, la presión total aplicada al modelo como una combinación de cargas la cual suma las dos condiciones de carga descritas y, de esa combinación, se obtienen los resultados.

Como se mencionó anteriormente, se realizaron dos casos de análisis, a saber:

### Caso 1. Espesor de muro variable.

Este análisis rige para la estimación de los desplazamientos en toda la altura del muro Milán y la trabe de coronamiento.



**Figura 42.** Variación del espesor efectivo del muro con la profundidad.

### Caso 2. Espesor de muro constante (e=100cm).

En este análisis se consideró que no existe variación del espesor del muro Milán, sino que se modela con 100 cm de espesor constante. De este modo, en comparación con el Caso 1, los desplazamientos encontrados serán menores, pero, en cambio, los elementos mecánicos sobre el muro serán más grandes, por lo que estos últimos registrarán en el diseño de los armados de dicho muro Milán.

En la realidad, debido al procedimiento constructivo de la lumbrera, es de esperarse que los valores de los desplazamientos y de los elementos mecánicos se encuentren en un punto intermedio de aquellos resultados obtenidos entre los Casos 1 y 2.

En el modelo se hace la variación del espesor de la pared por cada 5 m, así se tienen los espesores siguientes:

**Tabla 8.** *Espesores del muro Milán para análisis con Elemento finito.*

Profundidad (m)	Espesor de muro -elemento finito- (cm)
0-5	96
5-10	92
10-15	88
15-20	84
20-25	80
25-30	76
30-35	72
35-40	68
40-45	64
45-48.10	56.3

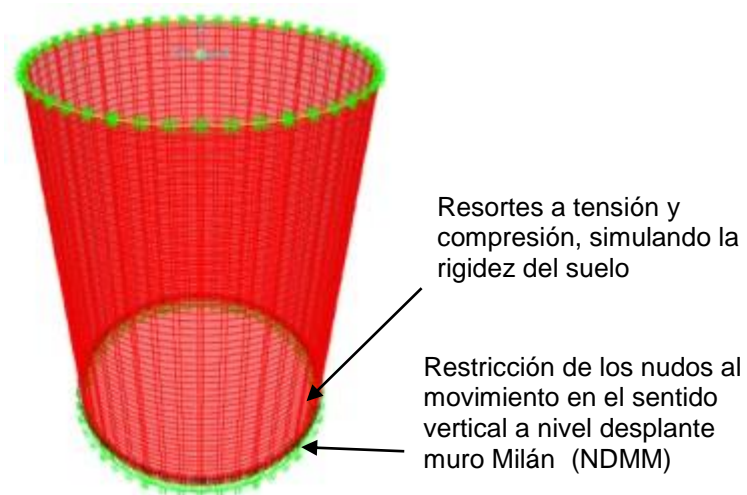
En la cabeza de la lumbrera se modela también la trabe de coronamiento con elementos discretos tipo “Frame” de sección de 1.0mx2.0m.

Cada elemento finito de la pared de la lumbrera, así como los elementos tipo Frame de la trabe de coronamiento, tienen las propiedades de rigidez y peso volumétrico que corresponden a un concreto de resistencia  $f'c$  de  $350 \text{ kg/cm}^2$  a los 28 días; es decir, que se tiene un módulo de elasticidad, en  $\text{kg/cm}^2$ , de  $E=14000\sqrt{f'c}$  (NTC-Concreto) y un peso volumétrico de  $g = 2.4 \text{ t/m}^3$ .

### Condiciones de apoyo.

El modelo tridimensional posee los 6 grados de libertad de movimiento (X, Y, Z, Rx, Ry y Rz) en toda la altura, excepto en la base, a 48.10 m de profundidad, en donde se restringe el movimiento vertical de los nudos.

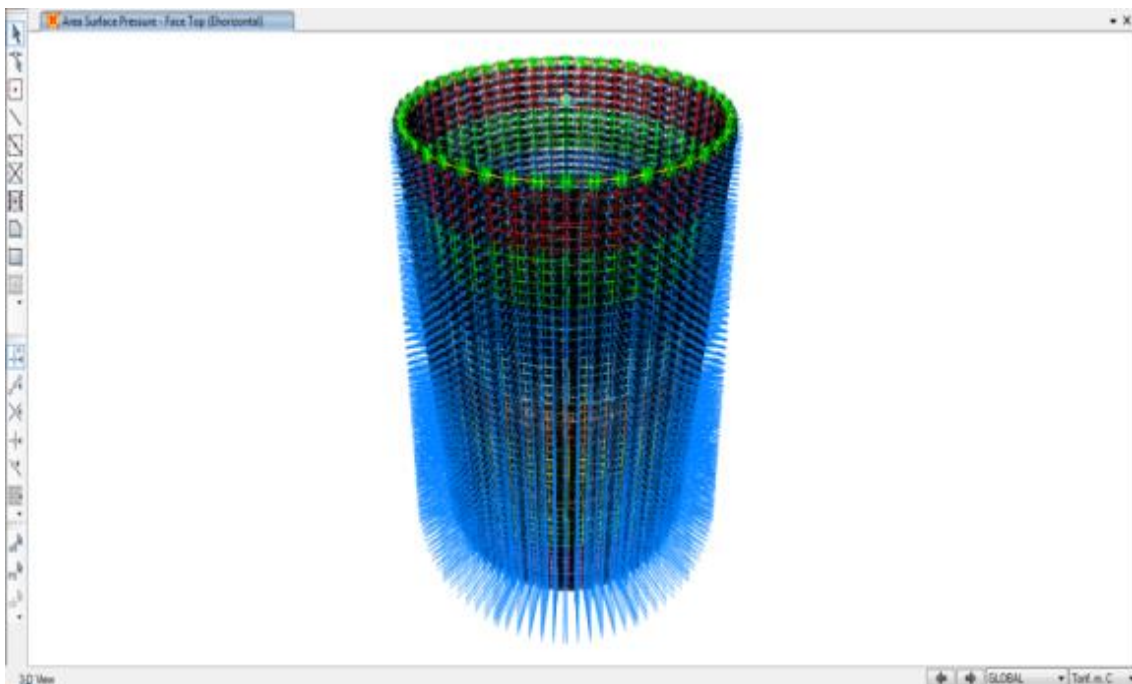
Con el fin de tratar de reproducir las condiciones reales de la lumbrera, en los nudos a nivel de desplante del muro Milán se coloca restricción al movimiento vertical ( $U_z$ ) vertical al movimiento, y del nivel lecho inferior de la losa de fondo -45.60 m, hasta el nivel -48.10 m, se colocan resortes a tensión y compresión  $k_s=4500 \text{ t/m}^3$ , simulando el suelo por debajo de la lumbrera (ver Figura 43).



**Figura 43.** Restricciones al movimiento de los nudos.

### Consideraciones de carga.

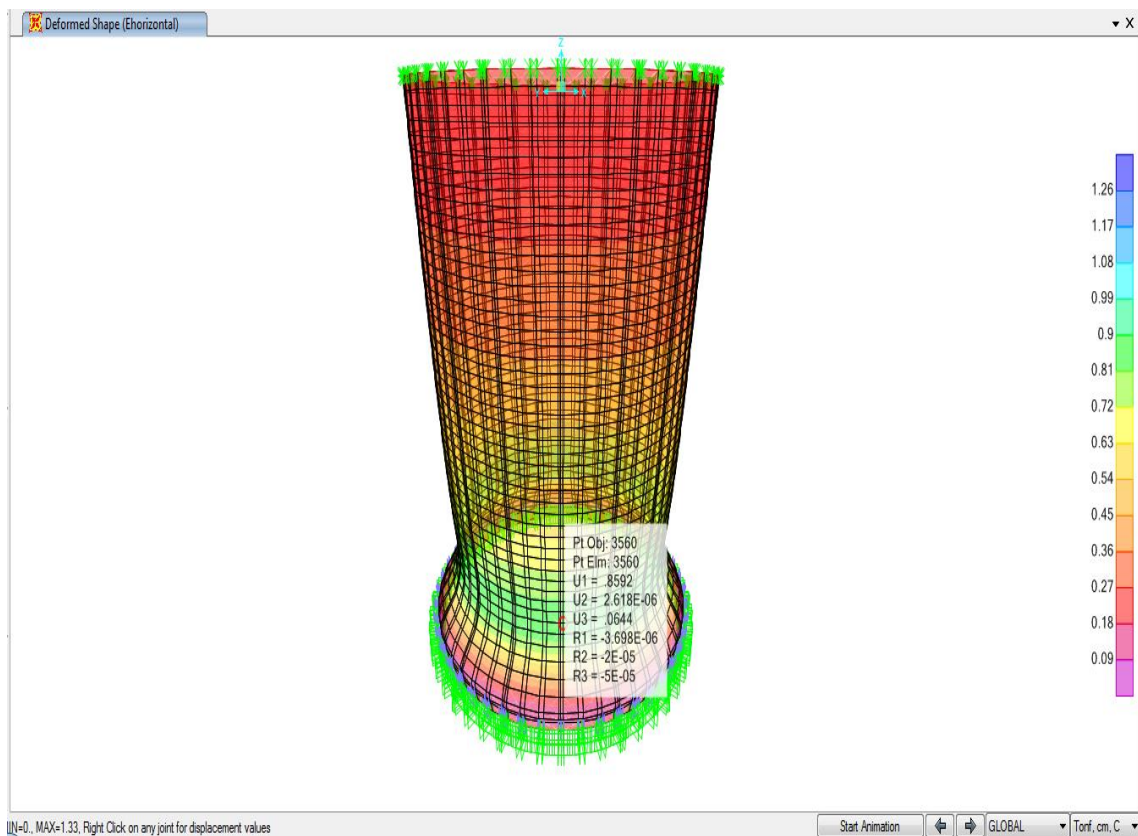
Las cargas correspondientes a las presiones de poro y al esfuerzo horizontal efectivo del suelo, se aplican, en forma de presión, sobre la pared exterior de la lumbrera. Estas presiones tienen variación con la profundidad de acuerdo a las propiedades del suelo que rodea a la lumbrera (ver Tabla 3 y 4):



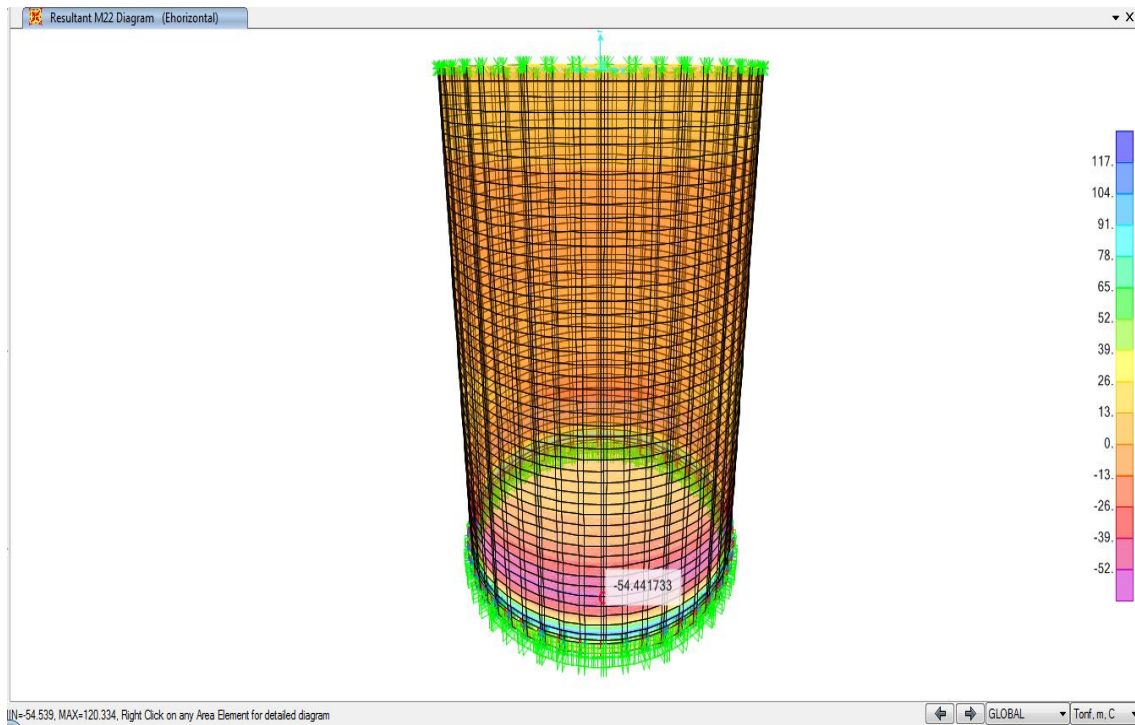
**Figura 44.** Asignación de la carga a los shells, empuje en la base de 57.09 t/m<sup>2</sup>.

El modelo tridimensional haciendo que los elementos finitos que corresponden a ella, tengan una rigidez a flexión horizontal nula, logrando con ello la redistribución de esfuerzos que se presentará en la realidad.

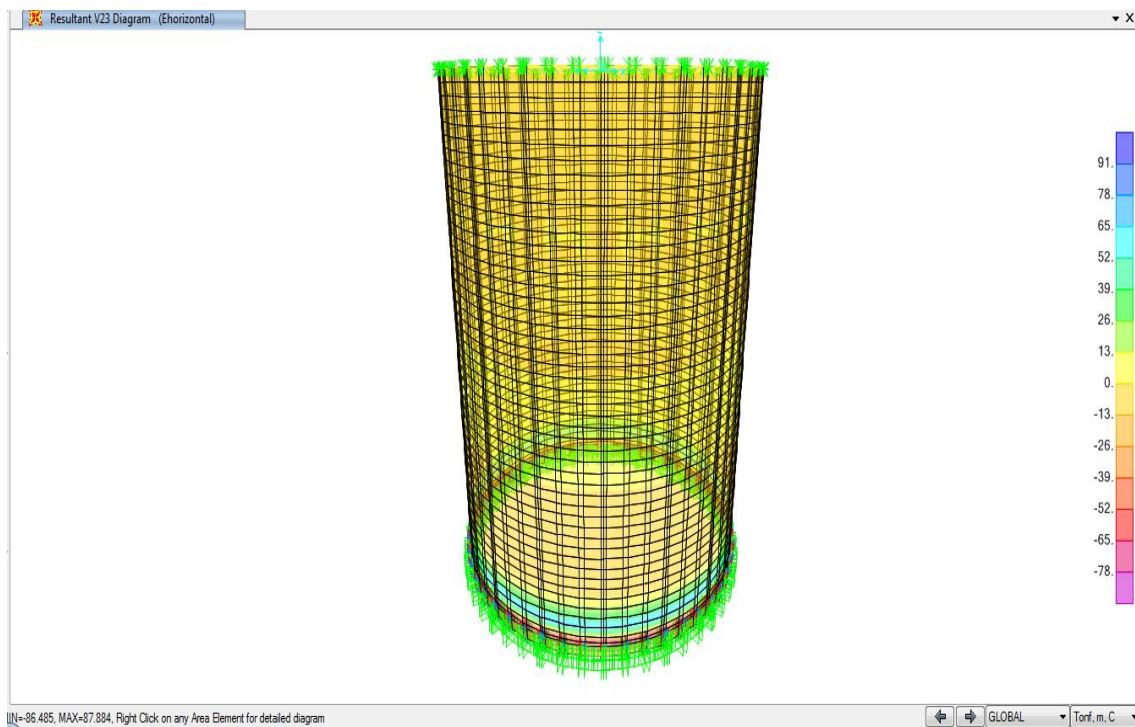
Del modelo se obtienen finalmente los desplazamientos horizontales debidos a los empujes totales del suelo, los elementos mecánicos en dirección vertical y horizontal, así como los esfuerzos de compresión, tensión y cortante en la pared de la lumbrera. Adicionalmente se obtienen las deformaciones y elementos mecánicos de la trabe de coronamiento.



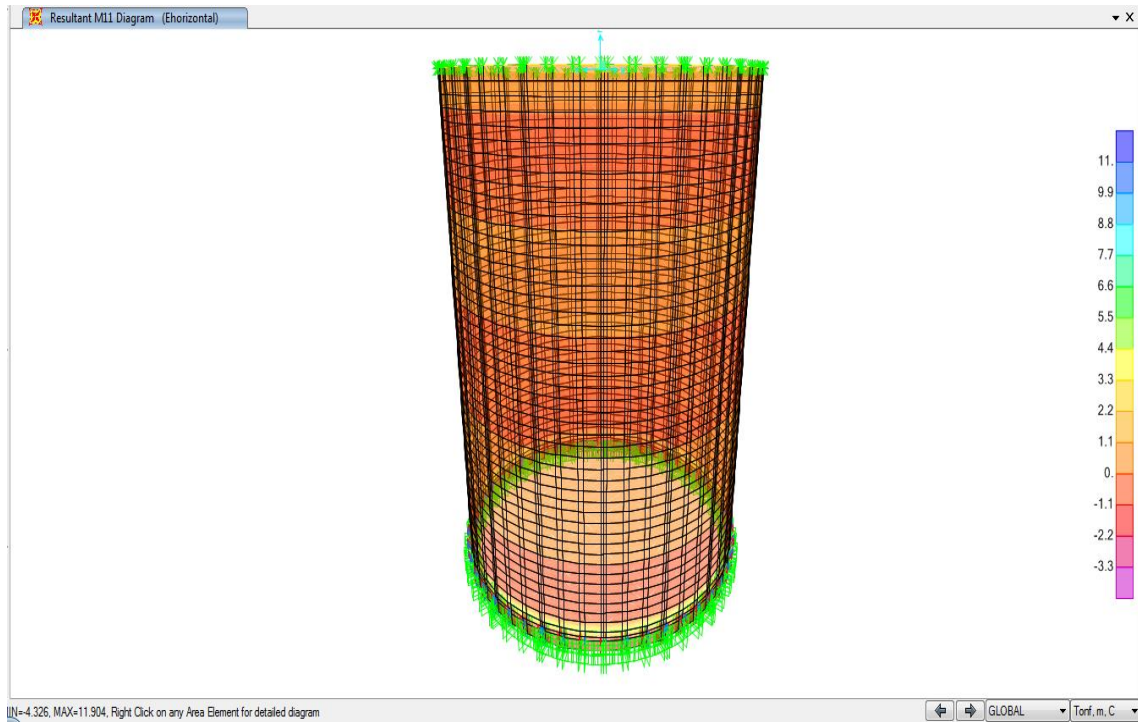
**Figura 45.** Geometría deformada de la lumbrera (en cm), vista en tridimensional. Modelo lumbrera 35.10m\_UNT\_Cilindro espesor variable\_rev A\_23-10-18.



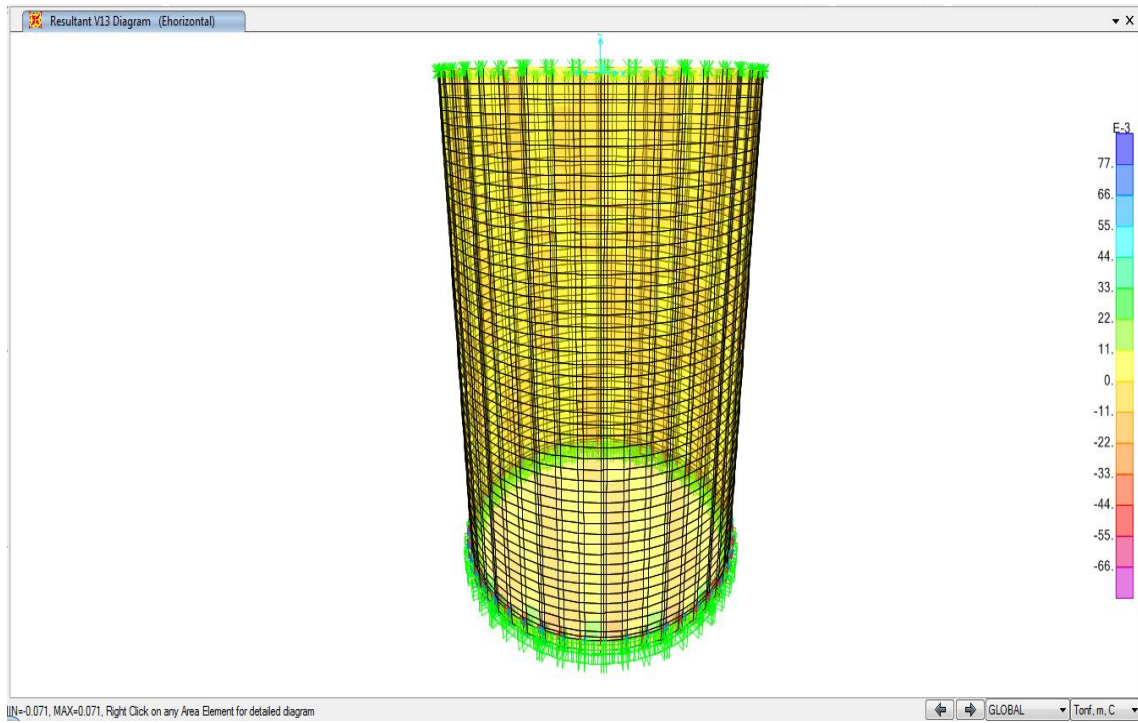
**Figura 46.** Momento flexionante vertical M22 (en t m). Modelo lumbrera 35.10m\_UNT\_Cilindro espesor constante\_rev A\_23-10-18.



**Figura 47.** Fuerza cortante vertical V23 (en t). Modelo lumbrera 35.10m\_UNT\_Cilindro espesor constante\_rev A\_23-10-18.



**Figura 48.** Momento flexionante horizontal M11 (en t m). Modelo lumbreira 35.10m\_UNT\_Cilindro espesor constante\_rev A\_23-10-18.



**Figura 49.** Fuerza cortante horizontal V13 (en t). Modelo lumbreira 35.10m\_UNT\_Cilindro espesor constante\_rev A\_23-10-18.



Del modelo se obtienen finalmente los desplazamientos horizontales debidos a los empujes totales del suelo, los elementos mecánicos en dirección vertical y horizontal, así como los esfuerzos de compresión, tensión y cortante en la trabe de coronamiento.

Las siguientes figuras son un resumen de los resultados obtenidos.

En la parte siguiente se presentan los desplazamientos y esfuerzos obtenidos con el modelo a espesor variable (ver Modelo lumbrera 35.10m\_UNT\_Cilindro espesor variable\_rev A\_23-10-18) y los esfuerzos con el cilindro a espesor constante (ver Modelo lumbrera 35.10m\_UNT\_Cilindro espesor constante\_rev A\_23-10-18).

A continuación, se presentan las deformaciones críticas del muro. En las figuras y tabla siguientes se muestran los resultados obtenidos:

Comparando estos resultados con los obtenidos con el programa PARIS tenemos:

**Tabla 9.** Comparativa de resultados SAP2000 – PARIS para la condición extraordinaria.

	PARIS	SAP2000
Desplazamiento horizontal máximo	10.00 mm	8.59 mm
Momento-flexionante vertical máximo	49.50 t-m	54.44 t-m
Fuerza cortante vertical máxima	64.09 t	69.76 t

Con base en la comparativa anterior se validan los análisis realizados y el diseño se hará con las envolventes.

### 3.4.2 Diseño de muro Milán.

#### Revisión por flexión.

El diseño estructural del muro Milán se realiza considerando al muro como una trabe horizontal de concreto reforzado de ancho unitario.

Para la revisión antes señalada se toman como referencia las Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto del RCCDMX. Gaceta Oficial de la Ciudad de México. Diciembre, 2017.

Debido a que la construcción del muro se realiza por secciones (paneles), el diseño de los armados (normalmente de 3 jaulas de acero por panel), se particulariza en función del ancho de cada panel, para homogenizar el cálculo lo haremos por un metro lineal.

Para un concreto  $f'_c$  de 400 kg/cm<sup>2</sup>, la cuantía de acero mínimo con base en la Normas Técnicas Complementarias para Diseño de Estructuras de Concreto está dada por:

$$\rho_{\min} = \frac{0.7\sqrt{f'_c}}{f_y} = \frac{0.7\sqrt{400}}{4200} = 0.00333$$

Considerando que el peralte efectivo por flexión vertical "d" es 92.5 cm. Se necesitan  $100 \times 92.5 \times 0.00333 = 30.80$  cm<sup>2</sup> de acero de refuerzo por unidad de longitud, por lo tanto armar con var#8@15 cm para cumplir con la cuantía mínima para evaluar la resistencia a flexión,  $M_R$ . En dichas expresiones, el factor de resistencia, FR, se considera igual a 0.9.

$$M_R = FR b d^2 f''_c q (1 - 0.5q)$$

donde,

$$q = \frac{p f_y}{f''_c}$$

$$p = \frac{A_s}{b d}$$

- b ancho de la sección
- d peralte efectivo
- $f'_c$  resistencia especificada del concreto a compresión
- $f''_c$  resistencia nominal del concreto a compresión (=0.85  $f'_c$ )
- $f_y$  esfuerzo de tensión del refuerzo
- $A_s$  área del refuerzo de tensión

De esta manera, se analizó el único tipo de refuerzo en el muro bajo las siguientes condiciones de diseño:

- a) Normal: El esfuerzo de fluencia del acero de refuerzo al 60% y los elementos mecánicos actuantes con un Factor de Carga (F.C.) igual a 1.0
- b) Extraordinaria: El esfuerzo de fluencia del acero de refuerzo al 100% y los elementos mecánicos actuantes con un Factor de Carga (F.C.) igual a 1.4

Bajo estas condiciones se obtuvieron los momentos resistentes que se muestran a continuación:

<u>DATOS:</u>					
f'c=	400	(kg/cm <sup>2</sup> )		f*c(kg/cm <sup>2</sup> )=	320
fy=	2520	(kg/cm <sup>2</sup> )		f''c(kg/cm <sup>2</sup> )=	272
h=	100	(cm)	donde:		
r=	7.5	cm	recubrimiento		
d=	92.5	(cm)	peralte total de la sección		
b=	100	(cm)	peralte efectivo de la sección		
s=	15	cm			
#var=	8				
No. Var=	6.67	Pzas			
As=	33.78	(cm <sup>2</sup> )			
<u>CÁLCULO:</u>					
Cálculo del porcentaje de acero como viga balanceada:					
Es importante que si falla sea a tensión;					
pmin=	0.00555556				
P,bal.=	0.06460988				
pmax=	0.04845741				
Como P=As/bd, entonces:					
P=	0.00365195				<b>La viga falla a tensión (aceptada)</b>
q=	0.0338342				
MR=	<b>6966922</b>	(kg-cm)=		<b>69.67</b>	(t-m)

De esta manera, el refuerzo mínimo se estima un momento resistente último de **69.97 t-m**, en Condición Normal para ambos tipos de muros.

<u>DATOS:</u>					
f'c=	400	(kg/cm <sup>2</sup> )		f*c(kg/cm <sup>2</sup> )=	320
fy=	4200	(kg/cm <sup>2</sup> )		f''c(kg/cm <sup>2</sup> )=	272
h=	100	(cm)	donde:		
r=	7.5	cm	recubrimiento		
d=	92.5	(cm)	peralte total de la sección		
b=	100	(cm)	peralte efectivo de la sección		
s=	15	cm			
#var=	8				
No. Var=	6.67	Pzas			
As=	33.78	(cm <sup>2</sup> )			
<u>CÁLCULO:</u>					
Cálculo del porcentaje de acero como viga balanceada:					
Es importante que si falla sea a tensión;					
pmin=	0.00333333				
P, bal.=	0.03238095				
pmax=	0.02428571				
Como P=As/bd, entonces:					
P=	0.00365195		La viga falla a tensión (aceptada)		
q=	0.05639034				
MR=	11478328	(kg-cm)=	114.78	(t-m)	

De esta manera, el refuerzo mínimo se estima un momento resistente último de **114.78 t-m**, en Condición Extraordinaria para ambos tipos de muros.

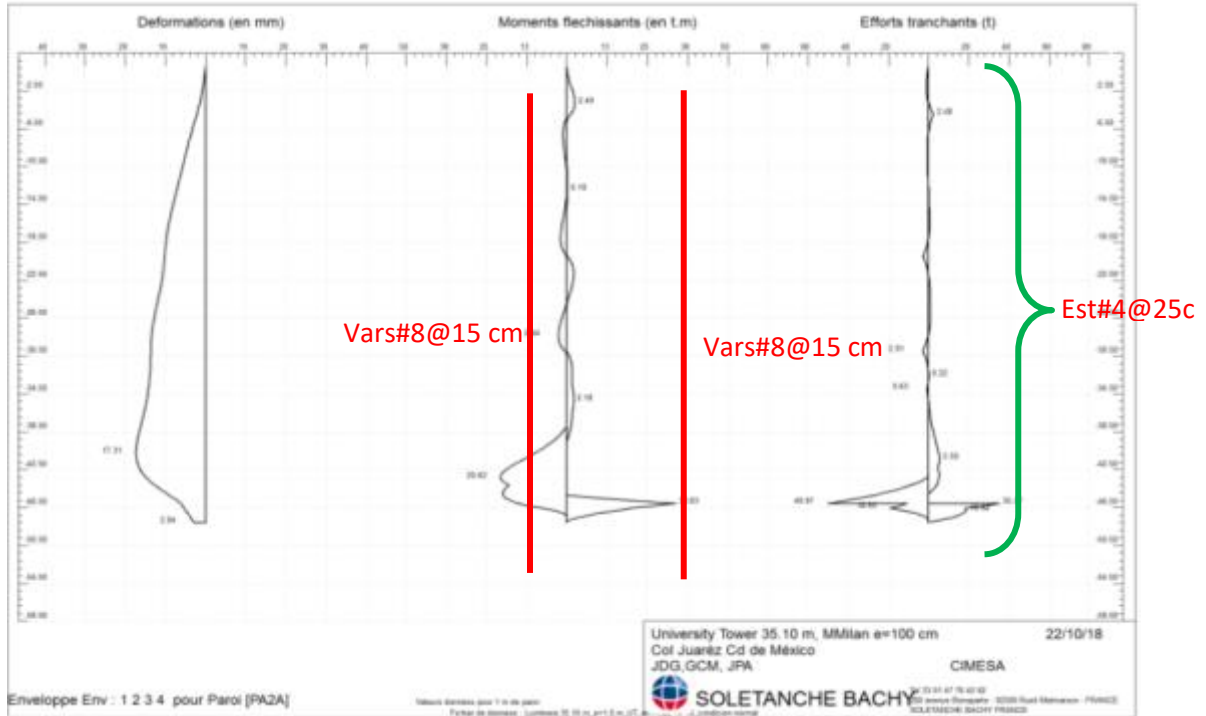
Con base en los elementos mecánicos presentados en la Tabla 9 el refuerzo antes presentado es suficiente para tomar los elementos flexionantes verticales en toda la lumbrera.

Se muestra el Momento Actante y el Momento Resistente en la lumbrera.

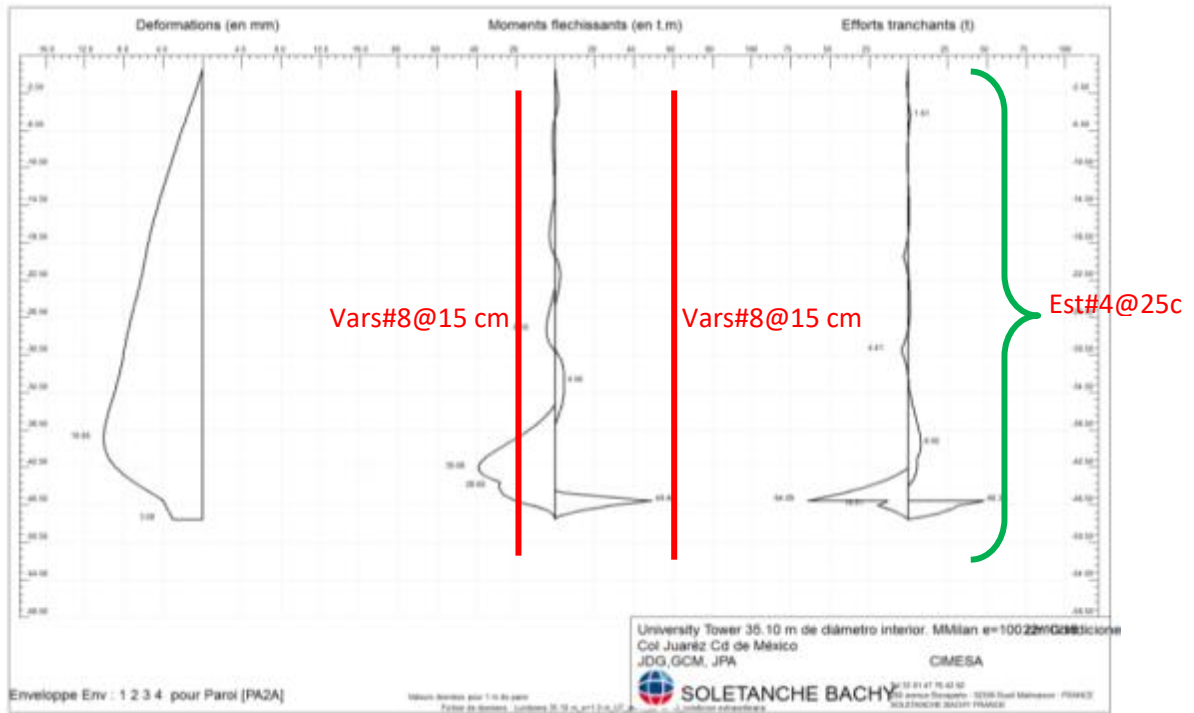
$M_u = 33.83 \times 1.0 = 33.83 \text{ t-m}$  (Figura 27) <  $M_{r_{var\#8}} = 69.97 \text{ t-m}$ , se acepta con el refuerzo mínimo para la condición normal.

$M_u = 54.44 \times 1.4 = 76.21 \text{ t-m}$  (Tabla 9, Sap2000) <  $M_{r_{var\#8}} = 117.78 \text{ t-m}$ , se acepta con el refuerzo mínimo para la condición extraordinaria.

Para el diseño de muro de 1.00 m, se propone entonces colocar varillas principales vrs#8 @ 15 cm (ver Figura 32 y 33).



**Figura 50.** “Diseño a flexión y propuesta de refuerzo vertical en muro desplantado a -48.1 m, muro Milán circular e=1.00 m. Condición Normal”.



**Figura 51.** “Diseño a flexión y propuesta de refuerzo vertical en muro desplantado a -48.1 m, muro Milán circular e=1.00 m. Condición Extraordinaria”.

## Revisión por cortante.

Para la revisión antes señalada se toma como referencia Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto del RCDF. Gaceta Oficial de la Ciudad de México. Diciembre, 2017.

El diseño estructural del muro Milán se realiza considerando al muro como un elemento ancho de concreto reforzado de ancho unitario.

$$V_{CR} = 0.5FRbd\sqrt{f'_c}$$

Se estima una resistencia al corte, dada por el concreto de  $V_{CR}=64.89$  t.

La distribución de acero por cortante para el muro desplantado a 48.10 m, queda de la siguiente manera:

Del nivel 0.00 a -48.10 m, se propone la instalación de un refuerzo transversal mínimo a base de estribos #4@25 cm. De acuerdo con los arreglos de estribos, se tendrán en promedio 3.00 ramas en cada metro de muro, por lo que la aportación del refuerzo transversal mínimo será de:

$$V_{SR} = \frac{FRA_v f_y d}{s} = \frac{0.75 \times 3 \times 1.27 \times 4200 \times 92.5}{25} = 44.40t$$

Por lo tanto, la resistencia total es,

$$V_R = V_{CR} + V_{SR}$$

$$V_R = 64.89 + 44.40 = 109.29 \text{ t}$$

$$V_A = 1.40 \times 64.09 \text{ (Tabla 9, SAP2000)} = 89.72 \text{ t} \leq V_R = 109.29 \text{ t, se acepta,}$$

$$V_A = 1.40 \times 69.76 \text{ (Tabla 9, SAP2000)} = 97.66 \text{ t} \leq V_R = 109.29 \text{ t, se acepta.}$$

# CAPÍTULO 4. PROCESO CONSTRUCTIVO.

## 4.1 Planeación y logística de ejecución.

Antes de cualquier otro evento, surge la importancia de definir la logística de ejecución, la cual tiene que ver básicamente con factores como: visualizar y analizar las diferentes alternativas que podrían llevarse a cabo, distribuir y asignar adecuadamente cada área dentro del predio para la ejecución de la obra, realizar cada etapa de construcción apegada al proyecto definitivo, amortizar tiempos de ejecución, dirigir los avances de obra, contemplar la cantidad de personal en los frentes de trabajo, evitar tiempos muertos y maniobras tardías de la maquinaria, contar con los suficientes equipos de construcción, llevar estricto control de los rendimientos de cada uno de los trabajos, etc.

La trascendencia que tiene la buena planeación y la efectiva logística para el desarrollo del proyecto es fundamental, ya que son la pauta para lograr el éxito en cada una de las etapas de construcción, y de ellas dependen los trabajos que se ejecuten durante su proceso; a su vez, conformar apropiadamente los diferentes frentes de trabajo para que estos puedan avanzar sin generar atrasos o reducirlos al mínimo. Aunado a esto, debe existir buena comunicación y coordinación entre los responsables y jefes de obra; esto podrá eficientar y resolver cualquier percance que se presente durante el desarrollo del proyecto. Una adecuada planeación y bien coordinada logística de ejecución, nos darán los argumentos suficientes para tomar correctas decisiones en el transcurso de la obra, evitando y/o corrigiendo factores no previstos durante su estudio o previos a su ejecución.

Las etapas que se tienen previstas para ejecutar el proyecto son las siguientes:

- a) Trazo y construcción de brocales para muro Milán y Barrettes de concreto reforzado. Los brocales se construirán en una zanja excavada para este fin, colando los brocales contra la pared de la excavación. La secuencia constructiva en particular es: trazo, excavación, colocación de armado, colocación de cimbra y colado. No existe limitación para la longitud máxima a construir. La cimbra podrá retirarse una vez que el concreto pueda auto soportarse y la construcción de una etapa siguiente podrá iniciarse inmediatamente.
- b) Construcción de muro Milán de 1.0 m de espesor desplantado a 48.10 m de profundidad, con una desviación máxima con la vertical del 0.4%. La

desviación total como diseño del espesor del muro es de 0.8%. Cabe señalar que dentro de los análisis se consideró la desviación antes mencionada y se verificó que el espesor de 1.0 m es suficiente y adecuado. Adicionalmente, es importante señalar que el nivel de desplante del muro Milán -48.10 m está 1.45 m por debajo del nivel máximo de excavación (-46.65 m), con el fin de garantizar que la unión de la losa de fondo con el muro Milán se realice en una zona donde el concreto del muro se encuentre completamente sano. El diámetro interior del muro Milán es de 35.10 m, para ver la distribución de paneles (ver plano CIM-ING-UNT-PLA02), la secuencia constructiva de los paneles se definirá en obra. El diseño de la mezcla de concreto debe considerar que este debe ser autocompactable (revenimiento de 18 cm con tolerancia de  $\pm 2$  cm), además de tener un tiempo de espera suficiente con el cual se evite el fraguado inicial y la pérdida de revenimiento antes de la terminación del colado.

- c) Para la excavación de la lumbrera se contempla el uso de un bombeo únicamente para achique de agua en el interior. Se construirá un sistema de bombeo formado por pozos profundos controlando el bombeo de forma automatizada con electroniveles. Los pozos serán de sección circular de aproximadamente 6" de diámetro, hasta 52.0 m de profundidad, equipados con tubo metálico ranurado, rodeado por grava, como material de filtro desde el nivel de superficie hasta el nivel máximo. Estos se instalarán en el interior de la lumbrera.
- d) El sistema de bombeo se puede construir de forma simultánea a la construcción del muro Milán o antes.
- e) Con el fin de evitar riesgo de pérdida de fluido durante la perforación del muro Milán, deberá realizar un tratamiento previo con base en inyección de lechada a gravedad en ambas caras del muro Milán. Las inyecciones deberán realizarse con lechada cemento:bentonita (aproximadamente 300 kg de cemento y 10 kg de bentonita por cada  $m^3$  de agua), al menos a 48.10 m de profundidad en el muro Milán y a -74.00 m en las Barrettes. La dosificación exacta se definirá en obra. El objetivo de este pretratamiento es garantizar que durante la perforación del muro y el colado no se tengan pérdidas de lodo o concreto que pongan en riesgo la estabilidad de la zanja y la calidad del elemento que se construye.



- f) Concluido el muro Milán iniciará la construcción de la trabe de coronamiento.
- g) La excavación del núcleo a cielo abierto iniciará después de la construcción de la trabe de coronamiento. La primera etapa de excavación es a -2.00 m y así poder construir la trabe de coronamiento, después como última etapa de excavación es hasta el nivel -46.65 m; la excavación del núcleo central se realizará mediante Excavadora tipo CAT 312 ó equivalente y rezagando el material excavado con Grúas tipo Linkbelt 318 ó equivalente, equipadas con almeja de al menos 1.5 m<sup>3</sup> de capacidad. El material producto de la excavación se dispondrá en la zona de tiro definida por la Supervisión.
- h) Llegando al nivel máximo de excavación (-46.65 m). Los últimos 15 cm de excavación, aproximadamente, se deberán afinar a mano, para posteriormente colocar un firme de concreto pobre de aproximadamente 5 cm de espesor, previo al colado de la losa.
- i) La losa de fondo se colará en una sola etapa, por lo que en obra se deberán tomar las previsiones necesarias para un colado masivo continuo. Se deberá tener en consideración que se trata de un colado a más de 46.65 m de profundidad, por lo que se deberán tomar todas las previsiones necesarias para garantizar la homogeneidad del concreto, es decir, se debe evitar la segregación del mismo debido a la importante altura de caída. El acero de refuerzo se habilitará directamente en la ubicación de la losa, empleando varillas verticales (tantas como sean necesarias) para suspender las parrillas superiores en su posición.

## 4.2 Maquinaria y equipos.

La experiencia y profesionalismo de los operadores de maquinaria, así como el buen estado en el que se encuentren los equipos de construcción, es fundamental cuando se realizan trabajos de excavación profunda, ya que son estos quienes nos dan los avances de obra.

Cabe mencionar que los operadores de maquinaria pesada están capacitados y acreditados por el **DC-3**, constancia emitida y exigida por la Secretaria del Trabajo y Previsión Social (STPS) y la Cámara Mexicana de la Industria y la Construcción

(CMIC), lo cual garantiza eficiencia, calidad y seguridad durante la realización de los trabajos y las maniobras.

Algunos de los puntos a tomarse en cuenta durante el uso de maquinaria son: realizar su revisión rutinaria por personal certificado, delimitar áreas de tránsito para equipo pesado y personal, contar con señalamiento informativo y preventivo en obra, tener espacio suficiente para las maniobras, evitar que la maquinaria se estorbe entre sí, anticiparse a todas las actividades concernientes a la excavación para evitar tiempos muertos, evitar izar mayor peso del autorizado por el fabricante, no utilizar el teléfono celular por ningún motivo y programar los colados con tiempo.

De acuerdo a las especificaciones constructivas para este proyecto, se tiene lo siguiente:

- La excavación en zanjas para muro Milán y Barrettes deberá realizarse con equipo semiguizado, usando almeja hidráulica accionada con unidad de potencia de por lo menos 250 HP y equipado con inclinómetro para lectura y corrección de desviaciones con respecto a la vertical con una precisión del 1.0%, montado sobre una grúa de por lo menos 100 t de capacidad.
- El equipo de excavación deberá permitir la rectificación rápida de la verticalidad y el centrado constante y fijo de la herramienta de corte en posición de excavación.

La maquinaria principal y equipos propuestos para la ejecución de los trabajos se mencionan a continuación:

- *Grúas tipo Linkbelt 318 ó equivalentes, equipadas con almeja de al menos 1.5 m<sup>3</sup> de capacidad.* Su propósito es retirar el material de rezaga y limpiar la zanja hasta el nivel máximo de proyecto, previo a la colocación del armado de muro Milán. Para esta obra, se propone el uso de una grúa Liebherr HS 855 equipada con almeja hidráulica (Figura 52 y 53).



**Figura 52.** Grúa Liebherr HS 855 equipada con almeja hidráulica, previo a la colocación del armado de muro Milán; proyecto "MARHNOS, Lago Filt 7". (CIMESA 2018).



**Figura 53.** Grúa Liebherr HS 855 equipada con almeja hidráulica retirando el material de rezaga, previo a la colocación del armado de muro Milán. (CIMESA 2019).

- *Excavadoras tipo CAT 312 ó equivalentes (Figura 54).* Entre sus diversas funciones, están las de realizar maniobras referentes a la excavación del núcleo central, movimiento de tierras y traslado de material de la lumbrera hacia los camiones torton.



**Figura 54.** Excavadora CAT 312 realizando maniobras de movimiento de tierras; proyecto "MARHNOS, Lago Filt 7". (CIMESA 2018).

- *Retroexcavadora CAT 3C (Figura 55).* Debido al espacio tan reducido en el predio, tiene por objetivo principal realizar la excavación y retiro de la rezaga correspondiente al brocal de muro Milán y Barrettes.



**Figura 55.** Retroexcavadora CAT 3C; proyecto "Chapultepec 360". (CIMESA 2016).

- *Ollas de concreto (Figura 56)*. Se emplearán para transportar el concreto de la planta al sitio de la obra. Cuentan con capacidad de 7 m<sup>3</sup>.



**Figura 56.** Olla de concreto durante la realización de un colado; proyecto "MIRA, Río San Joaquín 498". (CIMESA 2018).

- *Camiones torton (Figura 57)*. Su función es trasladar el material de rezaga a un banco de tiro. Se ocuparán camiones con capacidad de caja de 14 m<sup>3</sup>.



**Figura 57.** Camión torton; proyecto "MIRA, Río San Joaquín 498". (CIMESA 2018).

- *Inclinómetros (Figura 58).* Permiten conocer y corregir las desviaciones de la perforación, asegurando de esta manera la verticalidad del muro, y a su vez, garantizando la transferencia de cargas a los estratos duros del suelo.



**Figura 58.** Inclinómetro capaz de monitorear el desplazamiento del muro Milán; proyecto "MARHNOS, Lago Filt 7". (CIMESA 2018).

- *Maxi Light (Figura 59).* Son torres de iluminación compuestas por lámparas de alta densidad que se usarán en los sitios con condiciones pobres de iluminación y en los trabajos nocturnos principalmente. Sus lámparas se pueden rotar y ajustar en posiciones a 360°, están equipadas con contactos de 120 y 220 V capaces de suministrar energía. Alcanzan alturas de 9 m y pueden mantenerse estables hasta en vientos de 100 km/h.



**Figura 59.** Maxi Light en proyecto "MARHNOS, Lago Filt 7". (CIMESA 2018).

- *Tubería Tremie (Figura 60)*. El colado de muro Milán y Barrettes se realizará con tubería Tremie de acoplamiento rápido y hermético, que consiste en unir los tramos con un sistema de cable para evitar el uso de cuerdas y coples. En el fondo del tremie existe una válvula para prevenir que el concreto entre en contacto con el agua. El tremie debe llegar hasta el fondo de la lumbrera antes de iniciarse el vertido del concreto. Al principio, se debe elevar algunos centímetros para iniciar el flujo del concreto y asegurar un buen contacto entre la mezcla de concreto y el fondo de la excavación.



**Figura 60.** Almacén (Rack) de tubería Tremie, incluye las tolvas para vaciado de concreto; proyecto "MARHNOS, Lago Filt 7". (CIMESA 2018).

- *Trampa (Figura 61)*. Se usa para soportar la tubería Tremie durante su acoplamiento o desacoplamiento. Se apoya en la parte superior del armado, una vez que este se ha colocado dentro de la excavación.



**Figura 61.** Presentación en obra de trampa para Tubería Tremie; proyecto "MARHNOS, Lago Filt 7". (CIMESA 2018).

- *Planta soldadora (Figura 62).* Se utiliza principalmente para realizar las conexiones en el armado de los paneles de muro Milán y en trabajos diversos. El personal que efectúa esta labor debe contar con certificación.



**Figura 62.** Planta soldadora presente en el predio. (CIMESA 2019).



- *Juntas CWS (Figura 63).* La banda tipo *Waterstop* de neopreno se coloca a través de una junta metálica de sección trapezoidal la cual se posiciona en el extremo de la excavación (extremo del panel) antes de la colocación del concreto, la banda de neopreno debe de ser completamente continua. La junta metálica y la banda de neopreno forman la junta tipo CWS® y sirve para cimbrar los extremos de los paneles colados en el terreno natural y para posicionar la banda impermeable que logra la estanqueidad entre los paneles del muro Milán. La preparación de esta junta se realiza paralelamente la excavación del panel a construir (Figura 63). Cabe mencionar que sus dimensiones las define la geometría del muro y que su colocación se realiza después del desarenado.



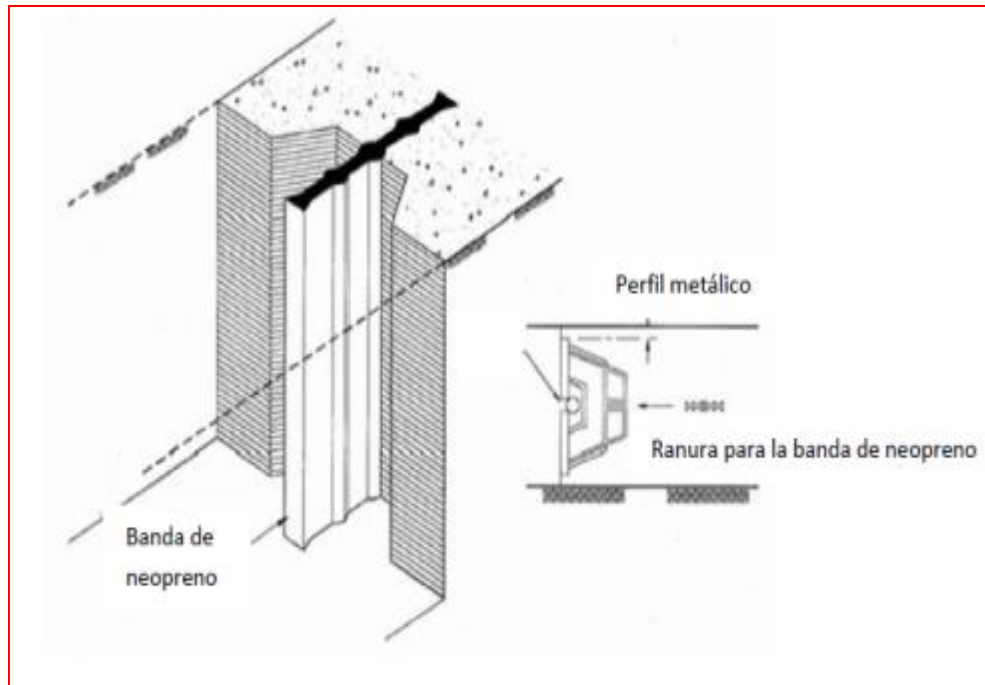
**Figura 63.** Junta CWS® colocada a un extremo del panel apoyada sobre un bloque de concreto para restringir su movimiento y evitar problemas de volteo. (CIMESA 2019).

Estas juntas tienen un mecanismo macho y hembra el cual ayuda a unir diferentes secciones para alcanzar la profundidad que indica el proyecto (Figura 64).



**Figura 64.** Junta metálica con sistema de macho y hembra; proyecto "Reforma 509". (CIMESA 2014).

Un proceso importante es el descimbrado de las juntas, ya que se debe esperar a que el concreto obtenga una resistencia de por lo menos  $100 \text{ kg/cm}^2$ , de esta forma la banda Waterstop se quedará embebida en el concreto del panel que fue colado.

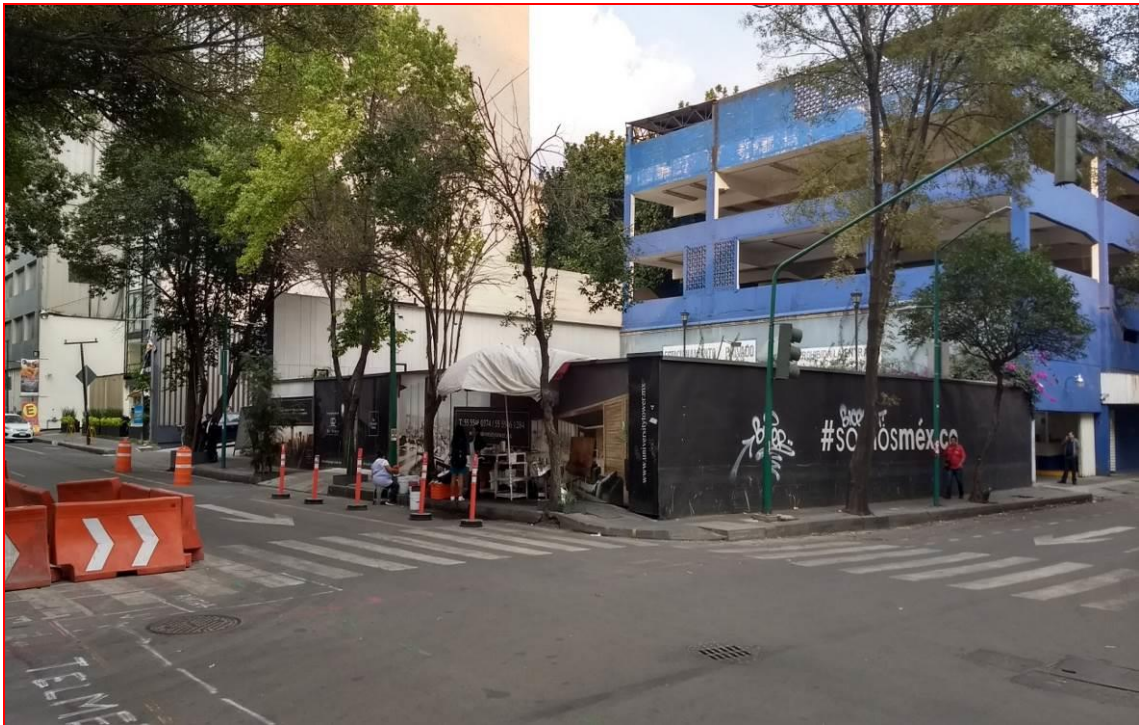


**Figura 65.** Banda Waterstop embebida en panel. Referencia: *Manual de Construcción Geotécnica, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, a.c.*

- *Planta de lodos (Figura 66).* Es un conjunto de silos que requieren de una ubicación estratégica, debido a la complejidad de su instalación y manejo, por lo cual, es una de las primeras actividades que se estudia y se realiza durante la logística de ejecución. Sirve para la producción continua de lodos bentoníticos con una dosificación de componentes precisa, con el fin de cumplir con las producciones solicitadas del proyecto, dependiendo de las necesidades y espacios disponibles de cada instalación. Cabe mencionar que debido al espacio tan reducido que existe en el terreno, se tuvo que rentar un predio frente al sitio de obra para la colocación de la planta de lodos, evitando reducir la superficie activa para las maniobras de la maquinaria pesada (Figura 67 y 68).



**Figura 66.** Planta de lodos típica, con silos de 40 y 45 m<sup>3</sup> de capacidad máxima; proyecto "MARHNOS, Lago Filt 7". (CIMESA 2018).



**Figura 67.** Predio frente al sitio de interés, antes de la colocación de planta de lodos. (CIMESA 2018).



**Figura 68.** Predio frente al sitio de interés, después de la colocación de planta de lodos.  
(CIMESA 2019).

- *Desarenador (Figura 69).* Es un equipo especializado con diversas funciones, entre las primordiales se encuentra limpiar el lodo de perforación y reciclarlo, previo a la instalación del armado y el colado del muro Milán.



**Figura 69.** Desarenador tipo Caviem y artesa para desecho de rezaga.  
(CIMESA 2019).



**Figura 70.** Detalle de desarenador tipo Caviem y tubería de extracción de lodo para desarenado; proyecto "Reforma 509", (CIMESA 2014).

- *Estación total (Figura 71).* Hablando específicamente de la excavación, se usará la estación total y la brigada de topografía para garantizar la localización precisa y la verticalidad de cada uno de los elementos; así como detectar desviaciones o desplazamientos del brocal, muro Milán, Barrettes y demás componentes de la cimentación, a fin de conocer su comportamiento estructural.



**Figura 71.** Estación total y brigada de topografía en el sitio de proyecto. (CIMESA 2019).

### 4.3 Materiales.

Referente a los materiales, estos deben cumplir con las especificaciones y la calidad que el proyecto demanda, tal como se describe a continuación:

- El concreto para los paneles de muro Milán será de tipo estructural Clase 1, con una resistencia especificada a la compresión simple  $f'c$  de 400 kg/cm<sup>2</sup>. El módulo de elasticidad del concreto para el muro Milán será de 280,000 kg/cm<sup>2</sup>.
- El concreto para las Barretes será de tipo estructural Clase 1, con una resistencia especificada a la compresión simple  $f'c$  de 350 kg/cm<sup>2</sup>. El módulo de elasticidad del concreto para Barretes será de 261,916 kg/cm<sup>2</sup>.
- El concreto para la losa de fondo será de tipo estructural Clase 1, con una resistencia especificada a la compresión simple  $f'c$  de 350 kg/cm<sup>2</sup>. El módulo de elasticidad del concreto para la losa de fondo será de 261,916 kg/cm<sup>2</sup>.
- El concreto para la trabe de coronamiento será de tipo estructural Clase 1, con una resistencia especificada a la compresión simple  $f'c$  de 400 kg/cm<sup>2</sup>. El módulo de elasticidad del concreto para la trabe de Coronamiento de 280,000kg/cm<sup>2</sup>.
- Peso volumétrico del concreto simple en estado fresco es igual a 2,200 kg/cm<sup>2</sup>.
- El acero de refuerzo tendrá un  $f'y$  de 4,200 kg/cm<sup>2</sup>.
- El módulo de elasticidad del acero es igual a 2.1e6 kg/cm<sup>2</sup>.
- Durante la excavación se deberá garantizar una carga de lodo de al menos 1.5 m sobre el Nivel de Aguas Freáticas (N.A.F.).
- El concreto para los Brocales será de tipo estructural, con una resistencia especificada a la compresión simple de  $f'c=200$  kg/cm<sup>2</sup>; con un módulo de elasticidad 113,137.08 kg/cm<sup>2</sup>.

- En la unión entre paneles adyacentes, deberá colocarse una junta tipo CWS® O SIMILAR, de tal forma que se garantice la continuidad del muro, así como la estanqueidad del mismo.
- El lodo bentonítico tendrá las funciones de estabilizar la perforación, recuperar el material producto de la excavación y enfriar la herramienta de perforación.
- El lodo bentonítico deberá garantizar los siguientes parámetros:

Parámetro	Lodo nuevo	Antes del colado
Viscosidad Marsh (s)	33-40	33-50
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	1.02-1.05	<1.15
Cake (mm)	<1	<3
PH (valor)	7-10	7-11
Contenido de arena (%)	0	<3

#### 4.4 Construcción de muro Milán estructural circular.

Con base en los estudios y análisis realizados y descritos anteriormente, las etapas a seguir para la construcción del muro Milán estructural circular serán las siguientes:

1. Trazo y Nivelación. Se deberán marcar sobre la superficie del sitio las ubicaciones y dimensiones de cada uno de los elementos proyectados. Como referencia, se toma alguno de los muros de las construcciones colindantes y respetando la geometría de proyecto, evitando así problemas posteriores como la invasión a cimentaciones vecinas, desplomes, deficiencias constructivas o fallas de carácter estructural. Para realizar esta etapa, se requiere de una brigada de topografía con una estación total y los elementos necesarios para su ejecución, obteniendo así la poligonal del terreno y la ubicación precisa de cada elemento.



**Figura 72.** Estación total y brigada de topografía; proyecto "MARHNOS, Lago Filt 7". (CIMESA 2018).

2. Construcción de brocal. Se erige sobre el desplante del muro definitivo, y sus funciones serán, entre otras: soportar los armados y la tubería tremie, servir para la ubicación de los paneles y guiar la herramienta de excavación lo más verticalmente posible. Para su construcción se debe contar con carpinteros, los cuales colocarán la cimbra después de la excavación; posteriormente una brigada de topografía que ubicará y dimensionará con precisión este elemento.

Se debe tener mucho cuidado con el brocal, ya que al estar en contacto directo con la almeja, tiene un desgaste importante, lo cual puede provocar su fractura o ruptura en ciertas ocasiones.





**Figura 73.** Zanja para alojamiento, previo a colado de brocal; Autor: Ing. Francisco Israel Callejas Quezada. (CIMESA 2011).

3. Excavación y lodos de perforación. Para ejecutar la excavación, se requiere contar con una planta o central de lodos, la cual debe estar ubicada estratégicamente para no entorpecer ni retrasar las maniobras de la maquinaria, y a su vez, sea eficiente con la demanda de lodos requerida en el sitio de obra.

La planta de lodos tendrá como funciones la fabricación y mezclado de los fluidos de perforación. Estos lodos tienen por objetivo principal estabilizar la lumbra y enfriar la herramienta de excavación. Por su parte, la planta está compuesta por silos para el almacenamiento de agua y fluidos de perforación, un digestor el cual tiene la función de mezclar a alta turbulencia este fluido, bombas sumergibles con gran carga hidráulica, tuberías, codos, mangueras y conexiones de 4" de diámetro.



**Figura 74.** Central de lodos de perforación, conformada por silos, desarenador, digestor, generador de energía, tarimas con bentonita; Autor: Ing. Francisco Israel Callejas Quezada. (CIMESA 2011).



**Figura 75.** Vista parcial de la central de lodos en el predio de interés. (CIMESA 2019).



**Figura 76.** Elementos necesarios para el funcionamiento de la central de lodos: bombas, tuberías, codos, mangueras, etc. (CIMESA 2019).

Son diversos los ensayos que deben realizarse a los lodos de perforación para garantizar su calidad, los cuales están normados por el *American Petroleum Institute*, en el documento titulado: “*Recommended Practice Standard Procedure for Field Testing Water-Based Drilling Fluids*”.

- **Viscosidad de Marsh:** indica un buen lodo, capaz de mantener la estabilidad de las paredes durante el proceso de excavación. Como características principales, el cono de Marsh o viscosímetro tiene diámetro de 6 pulgadas en la parte superior y una longitud de 12 pulgadas. En la parte inferior, un tubo de orificio liso de 2 pulgadas de largo, con diámetro interior de 3/16 de pulgada. También tiene una malla metálica con orificios de 1/16 de pulgada, cubriendo la mitad del embudo y está fijada a 3/4 de pulgada debajo de la parte superior del embudo.

Esta prueba se expresa en segundos, y se determina llenando el cono de Marsh con 1 500 ml de lodo. Posteriormente se toma el tiempo de flujo para el vaciado equivalente a 946 ml de lodo a través del orificio calibrado. Los parámetros para medir la viscosidad antes de la colocación de concreto son de 33 a 50 segundos, para este proyecto, y para efectos de calidad, esos parámetros deberán estar entre 33 y 40, garantizando una mejor calidad del lodo. Si sobrepasa los 40, es rechazado y deberá mejorarse esa mezcla.

Uno de los puntos importantes al tiempo que se realiza esta prueba, es mantener la misma altura del cono durante todo el ensaye, ya que si la persona encargada de realizarla sube o baja la distancia existente del cono al vaso, se podrían alterar los resultados finales.



**Figura 77.** Realización de la prueba de viscosidad; Autor: Ing. Francisco Israel Callejas Quezada. (CIMESA 2011).



**Figura 78.** Realización de la prueba de viscosidad; proyecto "MARNHOS, Lago Filt 7". (CIMESA 2018).

- **Densidad:** define la capacidad del lodo para ejercer una contrapresión en las paredes de excavación, controlando de este modo las presiones litostática e hidrostática existentes en la lumbrera.

Se realiza pesando en una balanza un volumen conocido de lodo. La escala de la balanza Baroid arroja directamente el valor de la densidad del lodo. La densidad de los lodos bentoníticos puede variar desde poco más de la unidad hasta 1.2 aproximadamente. Para conseguir densidades mayores y que el lodo siga siendo bombeable, es preciso añadir aditivos como el sulfato bórico (baritina) que tiene una densidad comprendida entre 4.20 y 4.35, lográndose lodos con densidades de hasta 2.4. Para rebajar la densidad será preciso diluir el lodo mediante la adición de agua.



**Figura 79 y 80.** Realización y verificación de la prueba de densidad; proyecto "MARNHOS, Lago Filt 7". (CIMESA 2018).

- **Contenido de arena:** es deseable conocer el contenido de arena de los lodos de perforación, debido a que un contenido excesivo de arena puede resultar en la deposición de un revoque de filtrado grueso sobre las paredes de la excavación, o podría sedimentarse en el pozo alrededor de las herramientas, cuando se interrumpe la circulación, interfiriendo con el éxito de la operación de las herramientas de perforación o el posicionamiento del revestimiento o casing. Un alto contenido de arena, también puede causar una excesiva abrasión de las partes de la bomba de circulación y de las conexiones de la tubería.

El control del contenido en arena se realiza mediante tamices normalizados, más concretamente, el tamiz 200 (200 hilos por pulgada, equivalente a 0.074 mm, 74 micras), expresándose en porcentajes. En un lodo se considera arena a la fracción fina que pasa por este tamiz. Para determinar la cantidad de arena que contiene, se toma una muestra de lodo de 100 cm<sup>3</sup> (100 ml), pasándola por la malla del tamiz 200. El residuo retenido sobre el tamiz después del lavado con agua, se vierte en un tubo de cristal graduado en %, de 100 ml de volumen, expresándose el contenido de arena por la lectura correspondiente. Existe un dispositivo específico denominado tamiz Baroid o elutriómetro, en el que el tamiz va intercalado entre un recipiente de volumen determinado y una probeta transparente graduada en porcentajes.

Para medir el contenido de arena, se llena el tubo de vidrio graduado hasta el nivel indicado, luego se diluye con agua y se procede a agitarlo. Posteriormente se vacía a través de la malla del tamiz 200 que acompaña al equipo. Después que la arena ha sido lavada con el agua se vacía de nuevo en la pipeta y se mide el volumen por medio de la graduación de esta. El límite de contenido de arena permitido antes de la colocación de concreto es de 3%.



**Figura 81 y 82.** Realización de la prueba de contenido de arena; proyecto "MARNHOS, Lago Filt 7". (CIMESA 2018).



**Figura 83 y 84.** Verificación de la prueba de contenido de arena; proyecto "MARNHOS, Lago Filt 7". (CIMESA 2018).

- **Prueba de cake y de filtrado:** son dos ensayos realizados en la misma prueba. Primeramente el cake es una costra, la cual proporciona una cierta cohesión a las formaciones en contacto con la perforación ayudando a sostener sus paredes al mismo tiempo que las impermeabiliza, dificultando el paso del lodo hacia los acuíferos. Es por ello que un buen lodo debe permitir la formación del cake, el cual debe ser resistente e impermeable. Resistente para que no sea fácilmente erosionable por el roce de la columna de perforación, e impermeable para que su espesor se mantenga dentro de estrechos límites, compatibles con el mantenimiento del diámetro de la perforación. La capacidad de construir el cake de un lodo depende del agua libre de este, así como de la permeabilidad de las paredes del sondeo. Para estimar estas capacidades se utiliza un filtro-prensa normalizado, haciéndose pasar el lodo durante 30 minutos, con la prensa tarada a una presión máxima de  $7 \text{ kg/cm}^2$ .

En esta prueba, la capsula de aire comprimido de nitrógeno es la que genera la presión. Este ensaye consiste básicamente en determinar la velocidad a la cual se fuerza un fluido a través de un papel filtro.

Para el desarrollo de obras de excavación dentro del grupo CIMESA, en lugar de realizar la prueba a 30 minutos, se realiza a cada  $7 \frac{1}{2}$  minutos. Esto con base en una gráfica existente que comprueba que los resultados de  $7 \frac{1}{2}$  minutos son muy similares a los de 30 minutos; aunque siempre que se inicia una obra se realiza a 30 minutos para tener un parámetro y realizar comparativas entre ambas, la cuales han resultado ser casi iguales.

Por otra parte, la pérdida de fluido es una de las propiedades más importantes del lodo de perforación. Si este fluido tiene una buena propiedad de pérdida de filtrado, mostrará un delgado e impermeable cake.

El ensayo de filtrado se realiza en un filtro-prensa y corresponde a un volumen de agua que se extrae de una muestra de fluido sometida a presión de modo que se filtre el agua, se mide en ml.



**Figura 85, 86 y 87.** Realización de la prueba de cake y de filtrado; proyecto "MARNHOS, Lago Filt 7". (CIMESA 2018).



**Figura 88.** Verificación de los resultados de la prueba de cake; proyecto "MARNHOS, Lago Filt 7". (CIMESA 2018).



Cuando no se tiene cuidado con los parámetros anteriores se llegan a presentar problemas graves, la pérdida de fluido de perforación se debe a diferentes factores, en ocasiones no se tienen planos de tuberías de alcantarillado viejas y por ahí se escapa el fluido de excavación. Ya que se detecta la pérdida de fluido, se deja bajar su nivel para buscar la tubería, una vez identificada se le coloca un tapón y se continúa la excavación.

Si el problema no es el anterior, se adiciona más bentonita y un aditivo especial a la dosificación, a fin de tener un mayor espesor de cake y mayor densidad. Si el nivel de fluido de excavación sigue bajando se debe a que se está fugando por un estrato de suelo con cavernas, lo que procede es rellenar parte de la excavación con una mezcla de arena y mortero y compactar este relleno dentro de la excavación con la almeja, esto ayudará a sellar parte del estrato y tener menor pérdida de fluido.

Este tipo de acciones se deben de tomar con rapidez, de lo contrario podemos correr el riesgo a que se presente un caído de material por la socavación y por el peso de la maquinaria se presente algún accidente.

4. Paneles de muro. La lumbrera se realizará con una excavadora acoplada con almeja hidráulica semiguiada por medio de un Kelly sobre los primeros metros de perforación, después se trabaja en forma de péndulo, la almeja queda suspendida con los cables de los malacates de la grúa.

Este equipo que se monta sobre una grúa de orugas de por lo menos 100 t de capacidad, acoplado con una almeja de 2.7 m de largo y espesor variable de 0.6 m a 1.5 m, activada con el equipo hidráulico de la grúa, de 250 HP de potencia, que suministra la energía hidráulica al sistema. También ofrece un sistema equipado con inclinómetro para lectura y corrección de desviaciones con respecto a la vertical con precisión del 1.0% de la profundidad.

La estabilidad de la zanja se debe a las fuerzas estabilizadoras del fluido de excavación que actúan sobre paredes de la lumbrera. Este efecto estabilizador se obtiene gracias a la formación del cake de filtración, que actúa como una costra impermeable evitando que la pared de la excavación se desmorone y que el agua subterránea no se infiltre a la lumbrera.

Los principales factores que afectan a la estabilidad de la excavación durante su ejecución son los siguientes:

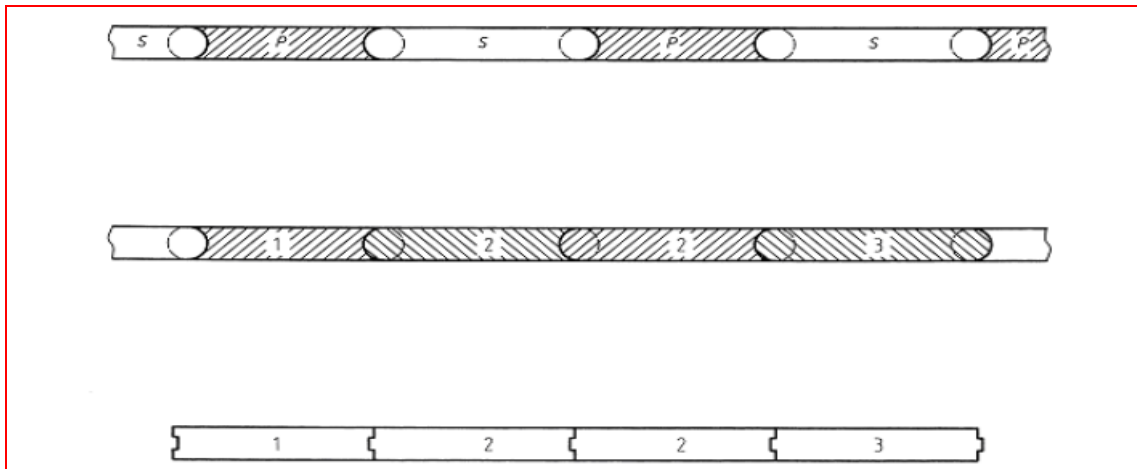
- \* Las propiedades y el nivel del fluido de excavación.
- \* La longitud de los paneles de muro Milán.

- \* El tiempo durante el cual la lumbrera permanezca abierta.
- \* La estratigrafía presente en el sitio.
- \* Suelos gruesos, permeables o que el terreno contenga huecos.

La secuencia de excavación y la longitud de los paneles dependen de las condiciones del suelo, el proyecto ejecutivo, el tamaño de la obra y del tipo de herramienta que se utiliza.

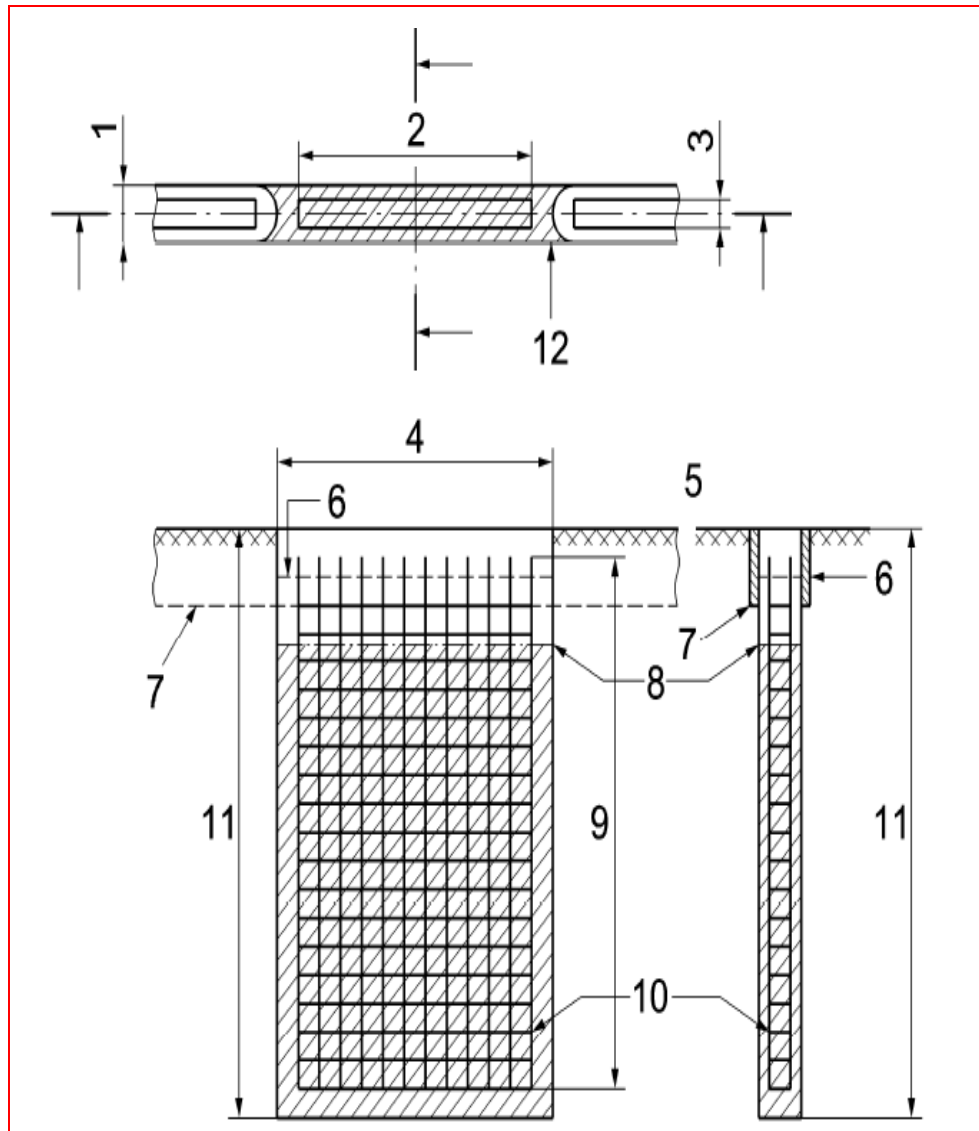
Los paneles se dividen en tres tipos:

- \* Primarios o de inicio.
  - \* Secundarios o mixtos.
  - \* Terciarios o de cierre.
- A continuación se muestran esquemas de diferentes tipos de paneles y juntas, con base en la Norma Francesa NF EN 1538: "Execution of special geotechnical work Diaphragm walls". October 2010.



P = Primario  
 S = Secundario  
 1 = Inicio  
 2 = Intermedio  
 3 = Cierre

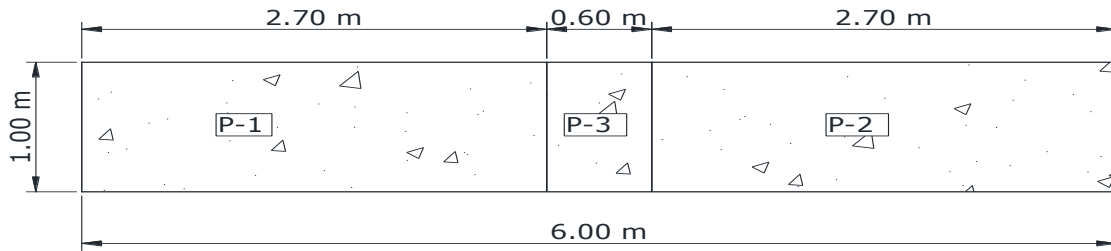
**Figura 89.** Ejemplos esquemáticos de diferentes tipos de paneles y juntas (vista en planta).



**Figura 90.** Esquema y geometría de un panel de muro Milán.

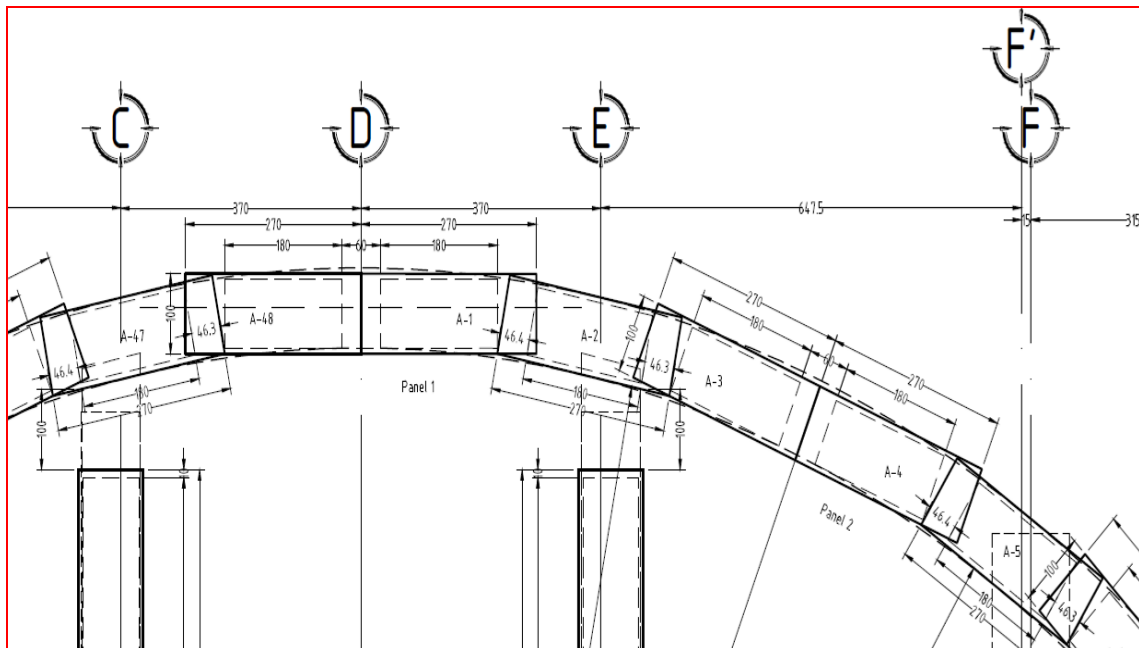
- |   |  |
|---|--|
| 1. Espesor de muro (B)                      | 7. Brocal o muro guía                        |
| 2. Longitud horizontal de jaula de refuerzo | 8. Nivel de concreto colado                  |
| 3. Ancho de la jaula de refuerzo            | 9. Longitud vertical de la jaula de refuerzo |
| 4. Longitud del panel                       | 10. Jaula (acero) de refuerzo                |
| 5. Nivel de la plataforma de trabajo        | 11. Profundidad de excavación (D)            |
| 6. Nivel de concreto sano                   | 12. Parte cóncava de las juntas curvadas     |

La excavación de un panel se realiza en tres posiciones, las posiciones 1 y 2 con una longitud delimitada por la herramienta de excavación que es de 2.70 m, que se sitúan a los costados del panel y una central, o también llamada merlon. La posición central tiene una geometría variable dependiendo de la longitud del panel, en este caso también corresponde a los 2.70 m, de acuerdo al proyecto ejecutivo.



**Figura 91.** Descripción típica de un panel de muro Milán.

La logística de ejecución implementada para iniciar la excavación y ubicar correctamente los paneles a construir, se definió con base en las condiciones encontradas en campo y las circunstancias presentes en el sitio de obra, a fin de no generar atrasos y cumplir con los términos acordados con el cliente.



**Figura 92.** Corte en planta de la distribución de paneles de muro Milán. (CIMESA 2018).

5. **Desarenado.** Una vez que se termina de excavar un panel, se procede a desarenar la lumbrera. Esto consiste en sustituir el lodo de excavación usado por fluido nuevo. Se recicla o sustituye el lodo que fue utilizado para la excavación, a fin de cumplir con los parámetros mínimos indicados en las pruebas de calidad mencionadas anteriormente.

Esta operación se realiza con una bomba sumergible acoplada en la tubería tremie y colocada en el fondo de la lumbrera, haciendo variar su posición.

El lodo bombeado se envía a la unidad de desarenado y, un lodo sano se incorpora al mismo flujo en la parte alta del panel.



**Figura 93.** Rezag del proceso de desarenado de muro Milán. (CIMESA 2019).



**Figura 94.** Desarenado de muro Milán; Autor: Ing. Francisco Israel Callejas Quezada. (CIMESA 2011).



**Figura 95.** Desarenado de muro Milán; Autor: Ing. Francisco Israel Callejas Quezada. (CIMESA 2011).

Si no se cuidan parámetros mínimos en el proceso de desarenado, se pueden presentar problemas de calidad en el muro, se crea una junta de lodo entre los paneles y eso puede producir filtraciones de agua. Estos problemas se reflejan en cuanto se realiza la excavación, y lo que procede es retirar el lodo entre paneles, se inyecta un aditivo especial y por último se rellena con concreto.

6. Colocación de junta: La junta deberá tener una resistencia adecuada y ser muy recta en toda su longitud. En esta junta metálica se colocará una banda de neopreno (waterstop) continua y sin uniones, que se debe de desplantar hasta por lo menos 1.0 m por debajo del última losa, con el fin de crear estanqueidad entre los paneles.

Se coloca la mitad de la sección de la junta en una ranura soldada sobre el perfil metálico. Esta operación se realiza en obra, antes de colocar el perfil en el panel ya excavado, de manera que cuando se realice el colado del panel la banda de neopreno quede embebida en el concreto. Si una junta waterstop no se coloca adecuadamente, se presentan problemas de filtraciones, que pueden solucionarse con aditivos y concreto, pero que genera atrasos y costos no previstos.



**Figura 96.** Perfiles de acero para junta, previo a su colocación en la lumbrera; proyecto "MARNHOS, Lago Filt 7". (CIMESA 2018).



**Figura 97.** Izaje y colocación de junta waterstop dentro de la excavación; proyecto "MARNHOS, Lago Filt 7". (CIMESA 2018).



**Figura 98.** Junta waterstop colocada en la excavación del sitio de obra. (CIMESA 2019).

7. Colocación de acero de refuerzo. Antes de iniciar estos trabajos, cabe destacar que los armados tienen una sección diseñada para proteger las juntas waterstop previamente colocadas y que los armados de los paneles no descansarán sobre el fondo de la excavación, sino que se deberán apoyar en los brocales provisionalmente.

Los armados serán habilitados en la obra según las especificaciones de los planos aprobados por el cliente. Para nuestro caso, la primera sección de panel de muro Milán será colocado un tramo 26.0 m de la jaula número 1, posteriormente se realizarán los trabajos de soldadura previos al traslape con la jaula número 2, cumpliendo así con la especificación de llegar hasta los 48.10 m de profundidad planeados.

Una vez listos los paneles de refuerzo, se colocarán los ganchos de izaje, así como los aceros de rigidez que permitirán levantar las armaduras sin dañarlas ni permitir deformaciones. Deberán contar con soldadura de campo en las secciones de traslape, elementos de rigidez y azas de izaje.

Cada armado debe ser verificado y etiquetado para poder identificarlo. Internamente en el grupo, se colocan etiquetas rojas cuando el armado aún está en proceso de construcción, y con etiquetas verdes cuando el armado está listo para su colocación dentro de la excavación.



Los armados se bajarán uno después del otro y se quedarán suspendidos en los brocales (las armaduras de dos o más tramos se traslaparán).



**Figura 99.** *Habilitado de acero y armado de panel de muro Milan; proyecto "MARNHOS, Lago Filt 7". (CIMESA 2018).*



**Figura 100.** *Revisión y verificación del armado de muro Milán; proyecto "MARNHOS, Lago Filt 7". (CIMESA 2018).*



**Figura 101.** Trabajos de soldadura en armado de muro Milán; proyecto "MARNHOS, Lago Filt 7". (CIMESA 2018).

La secuencia de izaje y colocación del armado se muestra a continuación:

- Habilitado y armado de panel.
- Balancín. En este elemento se colocan las cadenas que se enganchan a las asas de izaje del armado.
- Patesca. En esta pieza trabaja el cable primario de la grúa.
- Eslingas con poleas. En este componente trabaja el cable auxiliar.



**Figura 102.** Maniobras para el izaje del armado de muro Milán; proyecto "MARNHOS, Lago Filt 7". (CIMESA 2018).



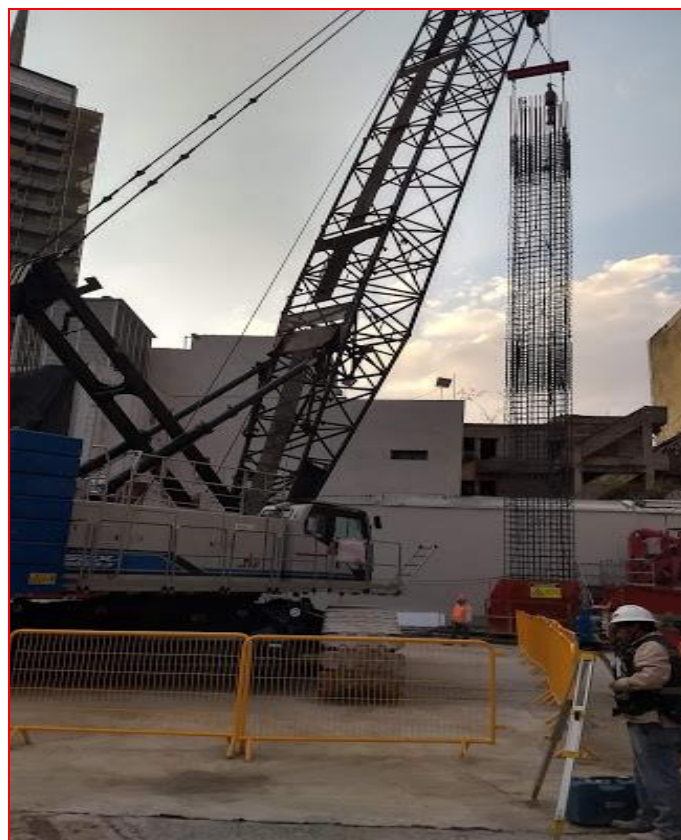
**Figura 103.** Inicio del izaje del armado de muro Milán; proyecto "MARNHOS, Lago Filt 7". (CIMESA 2018).



**Figura 104, 105 y 106.** Una vez colocados los elementos de izaje, se procede a levantar el armado de muro Milán; proyecto "MARNHOS, Lago Filt 7". (CIMESA 2018).



**Figura 107.** Izaje del armado de muro Milán; Autor: Ing. Francisco Israel Callejas Quezada. (CIMESA 2011).



**Figura 108.** Armado de muro Milán suspendido en el sitio de obra previo a introducirlo en la lumbrera. (CIMESA 2019).

Posteriormente se coloca el armado sobre la excavación y se procede a introducirlo, cuidando que este quede totalmente centrado.



**Figura 109.** Colocación del armado de muro Milán; Autor: Ing. Francisco Israel Callejas Quezada. (CIMESA 2011).



**Figura 110 y 111.** Maniobras para colocación del armado de muro Milán dentro de la lumbrera en el sitio de obra. (CIMESA 2019).

Se deja el armado sujeto al brocal y se procede a realizar el izaje de la parte complementaria del armado. Una vez terminado el izaje del segundo elemento, se coloca el armado de una jaula sobre la otra a fin de hacer el empalme, para posteriormente realizar las uniones mediante la aplicación de soldadura.



**Figura 112 y 113.** Trabajos de soldadura en el traslape de los armados de muro Milán en el sitio de obra. (CIMESA 2019).

Terminados los trabajos de soldadura, se procede a bajar el armado completo en toda la profundidad de la lumbrera.



**Figura 114.** Introducción del armado de muro Milán dentro de la lumbra; Autor: Ing. Francisco Israel Callejas Quezada. (CIMESA 2011).



**Figura 115.** Introducción del armado de muro Milán dentro de la lumbra; Autor: Ing. Francisco Israel Callejas Quezada. (CIMESA 2011).



**Figura 116.** Posición final del armado de muro Milán dentro de la lumbrera; Autor: Ing. Francisco Israel Callejas Quezada. (CIMESA 2011).

8. Colado de paneles. Posterior al posicionamiento final del armado, la tubería tremie se acoplará y se introducirá dentro del mismo, procurando anotar la longitud de cada uno de los tubos para saber cuántos metros de tubería se tienen dentro del concreto fresco.

El colado se realizará mediante tubería tremie, de manera que se evite la segregación. La tubería debe de estar limpia y estanca, su diámetro interior deberá ser superior o igual a 0.15 m y el diámetro exterior deberá ser tal que el tubo se mueva libremente dentro del armado. La cantidad de tubos a utilizar en un mismo panel se limitará a un recorrido horizontal del concreto a 2.5 m, o tener una tubería tremie por cada armado que se coloque en el panel. Cuando se utilicen varios tubos es preciso alimentarlos de manera que el concreto se distribuya de manera uniforme.





**Figura 117.** Rack de tubería tremie; proyecto "MARNHOS, Lago Filt 7". (CIMESA 2018).



**Figura 118 y 119.** Colocación de tubería tremie, freno de tubería y sonda para la medición del nivel de concreto, previo al colado; Autor: Ing. Francisco Israel Callejas Quezada. (CIMESA 2011).



**Figura 120.** Colocación de tolvas para colado de muro Milán; Autor: Ing. Francisco Israel Callejas Quezada. (CIMESA 2011).



**Figura 121.** Ejecución programada de colado de muro Milán; Autor: Ing. Francisco Israel Callejas Quezada. (CIMESA 2011).

Antes de empezar a colar, se reposará el tubo tremie sobre el fondo de la excavación y luego deberá elevarse aproximadamente 0.10 m. Será necesario evitar la mezcla de concreto con el fluido de excavación, disponiendo de un tapón que se colocará en el embudo, una vez que el concreto este por llenar el embudo, se quitará el tapón rápidamente (el tapón se coloca en el embudo, y es una placa redonda de acero provista de una asa y se extraerá con la grúa) para que el concreto fluya continuamente y desplace los sedimentos que se encuentran en el fondo de la excavación. Una vez comenzado el colado, la tubería tremie deberá de estar sumergida en el concreto fresco durante al menos 6 m antes de extraer la primera sección al inicio del colado. Inmediatamente después de extraer cada sección, la profundidad de inmersión no debe ser inferior a 3 m.



**Figura 122.** Colado de panel de muro Milán; Autor: Ing. Francisco Israel Callejas Quezada. (CIMESA 2011).



**Figura 123.** Corte de tubería en colado de panel de muro Milán; Autor: Ing. Francisco Israel Callejas Quezada. (CIMESA 2011).

Para verificar el nivel del concreto se introduce una sonda, la cual está equipada de nudos, cada nudo es un metro y en la parte baja se coloca un peso, se anota el nivel y se compara en una gráfica que contiene en sus ejes el volumen en  $m^3$  de concreto contra la profundidad del panel. Este documento sirve para tener un control y saber cuántos metros de tubería puede ser extraída, cuidando así que siempre quede sumergida por lo menos 3 m dentro del concreto fresco, para asegurar que este sea sano y no se mezcle con la bentonita, también para saber el sobre volumen de concreto que se colocó.

Una vez que se llegó al nivel de concreto de proyecto, se extrae la tubería y se limpia para ser almacenada nuevamente en el rack.



**Figura 124.** Revisión del nivel de concreto colado en panel de muro Milán; Autor: Ing. Francisco Israel Callejas Quezada. (CIMESA 2011).

Uno de los problemas más frecuentes que pueden surgir durante la etapa de colado, es que la planta de concreto presente fallas mecánicas, por lo tanto, antes de iniciar un colado se debe asignar una proveedora alterna. Otro caso es que al estar realizando el colado se tape la tubería, esto ocurre por una mala dosificación o un bajo revenimiento, por lo cual se debe subir y bajar la tubería con ayuda de la grúa, si esta operación no funciona lo que procede es sacar la tubería para destaparla, hecho esto, se debe de colocar un plástico a la parte baja de la tubería, (a fin de que el fluido de excavación no entre dentro de la tubería y contamine el concreto), se introduce la tubería en el concreto y se continua con el vaciado, el peso del concreto desplazará el plástico y se realizará el colado normalmente.

Por último, se debe tener cuidado con el nivel de concreto, tanto para que no quede por encima ni por debajo del nivel requerido en proyecto.

9. Control de calidad. Se entiende que control de calidad es la verificación con la que se comprueba que la obra, los materiales, o la partida de obra tienen las características de calidad especificadas en el proyecto.

El personal encargado de cualquier etapa de la obra es el primer eslabón de la cadena del control de calidad. Cualquier fallo del responsable restará calidad a la obra, es por ello que se exigen certificaciones de control de calidad para los responsables de esta área.

La exigencia de un control de calidad es fundamental para evitar no solo la insatisfacción del cliente, sino riesgos y pérdidas debido al deficiente o inexistente control de calidad en la obra.

Regularmente en este tipo de obras, se contemplan tres aspectos básicos: 1. Control de calidad del proyecto: logística, planos, cálculos, etc. 2. Control de calidad de los materiales. 3. Control de calidad de la ejecución.

Un registro completo de los ensayos en los materiales y del concreto debe estar siempre disponible para revisión durante el desarrollo de la obra y por 2 años después de terminado el proyecto, y debe ser conservado para este fin por el inspector. Cabe destacar que cualquier laboratorio encargado de realizar pruebas de calidad, debe de estar certificado ante “EMA” Entidad Mexicana de Acreditación.

La Norma ISO 9004 define los costos de calidad, que van en función de la tipología de la obra (dimensiones, uso, cliente, etc.). Estos costos normalmente van entre 1% y 3% del costo de la obra.

Los siguientes controles de calidad son los que se realizan para cada una de las actividades y materiales que competen al muro Milán.

- **Control de calidad en acero y soldadura:** El refuerzo debe ser corrugado, excepto en espirales o acero de presfuerzo en el cual se puede utilizar barras lisas. La soldadura de las barras de refuerzo debe estar de acuerdo con “Structural Welding Code Reinforcing Steel”.

La ubicación y tipo de los empalmes soldados y demás soldaduras requeridas en las barras de refuerzo deben estar indicados en los planos de diseño o en las especificaciones técnicas del proyecto.

Estrictamente no debe soldarse cuando: las superficies estén húmedas, expuestas a la lluvia, nieve, existan altas velocidades del viento o cuando los soldadores estén expuestos a condiciones inclementes. Las superficies que van a soldarse deben estar lisas, uniformes y libres de rebabas, fisuras, grietas u otras imperfecciones que puedan afectar la calidad o resistencia de la soldadura; las superficies que van a soldarse y las adyacentes a la soldadura también deben estar libres de cascarilla suelta, escoria, humedad, grasa u otro material extraño que pueda evitar una soldadura apropiada o produzca humos perjudiciales.



**Figura 125.** Soldadura en asas de muro Milán; Autor: Ing. Francisco Israel Callejas Quezada. (CIMESA 2011).

- **Control de calidad en concreto:** Debe comprobarse que los aditivos son capaces de mantener durante toda la obra la misma composición y comportamiento que el producto usado para establecer la dosificación correcta del concreto.

El agua empleada en el mezclado del concreto debe ser limpia y estar libre de cantidades perjudiciales de aceites, ácidos, álcalis, sales, materia orgánica u otras sustancias nocivas para el concreto o el refuerzo.

Resistencia: Cuando la resistencia es la base de la aceptación del concreto, deben elaborarse especímenes de acuerdo con la NMX-C-160.

El número de muestras se considera como mínimo dos especímenes a la edad especificada de la muestra obtenida, según la NMX-C-161.

El resultado de una prueba debe ser el promedio de las resistencias obtenidas en los especímenes, excepto que si en algunos de ellos se

observó una deficiencia de muestreo, elaboración, manejo, curado o prueba, no se tomen y el promedio de las resistencias de los especímenes restantes debe ser considerado como el resultado de la prueba. No es motivo para rechazar el espécimen el que se obtenga una resistencia lo inferior a la especificada.

Las muestras para los ensayos de resistencia de cada clase de concreto colocado cada día deben tomarse no menos de una vez al día, ni menos de una vez cada 120 m<sup>3</sup> de concreto, ni menos de una vez cada 500 m<sup>2</sup> de superficie de losas o muros.

Una vez iniciada la colocación del concreto, esta debe efectuarse en una operación continua hasta que se termine el llenado del panel o sección, definida por sus límites o juntas predeterminadas.

Las actividades a revisar en los trabajos de muro Milán, que deberán tener un formato en cada una de las actividades son:

- *Fabricación de lodo*: densidad, viscosidad, contenido de arena, P.H., filtrado y cake.
- *Excavación*: verticalidad, profundidad, nivel de lodo en la perforación.
- *Habilitado y armado de acero*: ensayos de laboratorio de esfuerzo a la tensión, verificación e inspección de los armados, soldadura en asas de izaje, identificación y liberación con firma de la supervisión.
- *Colado del panel*: calidad de los agregados por parte de la concretera, revenimiento, ensayos de resistencia a la compresión a los 7, 14 y 28 días, prueba de permanencia, verificación del nivel de concreto sano, tiempo de vaciado.



**Figura 126.** Prueba de revenimiento previa a colado de muro Milán; Autor: Ing. Francisco Israel Callejas Quezada. (CIMESA 2011).



**Figura 127.** Cilindros para pruebas destructivas en concreto de muro Milán; Autor: Ing. Francisco Israel Callejas Quezada. (CIMESA 2011).

### **Trabajos posteriores.**

Una vez terminada la ejecución de muro Milán, se construirán las Barrettes de cimentación y la trabe de coronamiento, la cual ligará todos los paneles del muro. Para esto, se tendrán que demoler 2 m de la longitud del muro Milán, a fin de construir la trabe de liga.

En caso de haber alguna junta en la cual existan filtraciones se harán las reparaciones pertinentes.

Cuando se vaya a colar un panel nuevo a lado de uno viejo, se hace una inyección de lechada para evitar filtraciones.

Posteriormente, para la excavación del núcleo central, se debe abatir el nivel freático mediante los pozos de bombeo previamente instalados en cada una de las esquinas del predio.





**Figura 128.** Pozo de abatimiento del nivel freático en el sitio de obra. (CIMESA 2019).

#### **4.5 Excavación del núcleo hasta el Nivel Máximo de Excavación.**

Acto seguido a la construcción del muro Milán circular, se procederá a la excavación del núcleo central, la cual iniciará después de la construcción de la trabe de coronamiento. Se debe verificar mediante la brigada de topografía el levantamiento y ubicación de cada uno de los elementos que conforman la cimentación, sin causar afectaciones de ningún tipo al resto de las estructuras. Como primera etapa de excavación, se deberá demoler el muro Milán hasta llegar a -2.00 m, a fin de construir la trabe de coronamiento, la cual ligará los muros como una especie de anillo. Posteriormente, se realizará la etapa de abatimiento del nivel freático por medio de los pozos de bombeo previamente instalados en cada esquina del predio hasta -50.00 m. Concluido lo anterior, se construirán dos plataformas metálicas en voladizo para colocar una excavadora sobre cada una de ellas, las cuales estarán fijas en el sitio de excavación. La rezaga del material se realizará con almeja de al menos 1.5 m<sup>3</sup> de capacidad, y se dispondrá en la zona de tiro definida por la Supervisión.

Durante el proceso, para poder llegar al nivel máximo de excavación, al finalizar la construcción de la trabe de coronamiento, y posterior a que el concreto alcance una resistencia óptima (tres días aproximadamente), se deberá demoler el brocal y la plataforma de maniobras en caso de ser necesario, utilizando la excavadora tipo CAT 312 equipada con martillo un hidráulico.

Se continuará con la extracción del núcleo central hasta la profundidad especificada en el proyecto (-46.65 m), acto seguido se procederá a limpiar y afinar a mano completamente el interior de la lumbrera, se colocará un firme de concreto pobre de 5 cm aproximadamente previo al colado de la losa de fondo.

Por último, la losa de fondo se colará en una sola etapa, por lo que en obra se tendrán que tomar las previsiones necesarias para un colado masivo continuo. Se deberá tener en consideración que se trata de un colado a más de 46.65 m de profundidad, por lo que se deberán tomar todas las previsiones necesarias para garantizar la homogeneidad del concreto, es decir, se debe evitar la segregación del mismo debido a la importante altura de caída. El acero de refuerzo se habilitará directamente en la ubicación de la losa, empleando varillas verticales (tantas como sean necesarias) para suspender las parrillas superiores en su posición, y garantizando la calidad descrita durante el desarrollo de este capítulo.

## **4.6 Medio Ambiente.**

En casi todas las obras de ingeniería, se provoca un cambio en el medio ambiente, ya sea por el uso de materiales naturales para la construcción o por la modificación del entorno para la ejecución de un proyecto. Este hecho tiene una importancia especial en el caso de excavaciones y cimentaciones profundas.

Realizar la evaluación del impacto ambiental que estas acciones generan tiene como objetivo prevenir, mitigar y restaurar los daños al ambiente, así como la regulación de obras y actividades para evitar o reducir sus efectos negativos en el ambiente y en la salud humana.

Algunos efectos relacionados con la ejecución de excavaciones y construcción de cimentaciones profundas, son generados debido a ruido, generación de humos, tala de árboles, disposición de lodo bentonítico y vibraciones durante los trabajos.

El medio ambiente puede ser agresivo con los materiales con los que se construyen cimentaciones profundas, como acero y concreto. Se comentan algunas de las principales causas del deterioro de estos materiales.

## Contaminación.

### a) Ruido

El control del ruido en las construcciones cobra cada día mayor importancia. El control del ruido es necesario para proteger la salud de los trabajadores en el sitio, y para eliminar molestias al público en general.

El ruido se mide por su intensidad y su frecuencia. La unidad de medición de intensidad es el decibel (**dB**), que es una medida relativa de presión, que compara un ruido con el que apenas puede escuchar un oído normal. En la Tabla 10 se muestra una escala de ruidos.

En México, la norma técnica ecológica (NTE) CCR-001-88 (Legorreta, 1989), no establece los niveles permisibles de ruido en términos de decibeles; sin embargo, el Plan de Desarrollo Urbano de 1980, establece un nivel máximo permisible de ruido para la Ciudad de México (antes Distrito Federal) de **85dB**.

El código de trabajo de Gran Bretaña (Tomlinson, 1977) recomienda que ninguna persona se exponga a un nivel de ruido mayor de **90dB**, por ocho horas al día, en una semana de trabajo de cinco días.

**Tabla 10.** Escala de decibeles (Legorreta, 1989).

Fuente	Decibeles	Nivel
Cohete Saturno	150	Sordera
Jet al despegar	140	Doloroso
	135	
Avión a 200m (660ft) de altura	130	
Perforadora neumática		
Trueno	120	
Avión a 300m (990ft) de altura		
Motocicleta sin silenciador		
Banda de rock	110	Molesto
Camión a 30m (99ft)	90	Daño al oído a largo plazo
Aspiradora	80	Muy fuerte para muchos
Calle ruidosa	70	
Conversación ordinaria	60	
Área comercial	50	
Suburbio silencioso	40	
Área rural de noche	30	Bajo
Roce de hojas secas	20	
Respiración normal	10	
Umbral de audición	0	

### *b) Humo*

El humo proveniente de la maquinaria de excavación y de hincado de pilas puede generar problemas de contaminación al medio ambiente, especialmente en lugares con pocas corrientes de aire.

Los principales contaminantes atmosféricos, contenidos en el humo producto de los equipos excavaciones profundas, son:

- Monóxido de carbono (CO). Gas incoloro e inodoro, proveniente de la combustión incompleta de combustibles que contienen carbono.
- Partículas suspendidas. Partículas líquidas o sólidas, dispersas en la atmósfera, provenientes de la combustión de carbono, combustóleo y diésel.
- Bióxido de azufre (SO<sub>2</sub>). Gas incoloro, de olor picante, producto de la combustión del diésel.

Para medir la transparencia u opacidad de gases de combustión, se utiliza la escala de Ringelmann, con valores entre 0 y 5. Un gas de combustión en la escala de 5 no permite el paso de la luz. En el estado de California, en los E.U.A., no se permite que los martillos de hincado exhalen humos más allá de la escala 2 de Ringelmann.

### *c) Lodo bentonítico*

El lodo bentonítico puede contaminarse con sólidos, producto de la excavación, con concreto, dilución con agua subterránea, o altas concentraciones de sal. En algunos casos, los problemas de control y costo no justifican un tratamiento del lodo bentonítico, por lo que es preferible reemplazar todo el volumen usado.

Sin embargo, la disposición del lodo puede ser costosa, ya que es un contaminante donde quiera que se le coloque: en el drenaje municipal, ríos, lagunas, tiraderos de basura, u otros.

El tratamiento para la re-utilización parcial o total del lodo se puede llevar a cabo con algunas de las siguientes formas, o una combinación de estas:

- Tanques sedimentadores.
- Mallas vibratorias.
- Hidrociclones para eliminar arena.
- Centrifugadores.

Para eliminar el problema de la disposición, es factible utilizar un sustituto de la bentonita, con base en polímeros sintéticos total o parcialmente biodegradables con el tiempo.

### **Factores ambientales que afectan las cimentaciones profundas.**

#### *a) Agentes agresivos al concreto*

El concreto en las cimentaciones profundas puede estar sujeto a alguno de los siguientes problemas de deterioro:

- Destrucción debido a componentes químicos.

El agua y el suelo pueden ser agresivos al concreto si contiene ácidos libres, sulfitos, sulfatos, ciertas sales de amonio, aceites y grasas o ciertos componentes orgánicos.

En general, para concretos en contacto con agua o suelo con un valor de pH mayor de 6 no requiere precauciones, y el uso del cemento Portland normal es satisfactorio.

Para suelo o agua con  $3.5 > \text{pH} > 6$ , se recomienda el uso de cemento supersulfatado, en concreto con relaciones agua-cemento de 0.4, o menores.

#### *b) Agentes agresivos al acero*

La velocidad de corrosión depende de la composición del suelo y la textura, profundidad de empotramiento y contenido de agua.

La disponibilidad de oxígeno es otro factor que debe considerarse para una evaluación de corrosión. Por ejemplo, en suelos gruesos, la corrosión puede acercarse a las condiciones atmosféricas; por otro lado, en arcillas, la deficiencia de oxígeno puede resultar en condiciones de baja corrosión.

#### *c) Cambios en el entorno*

Se pueden producir algunos cambios en el medio ambiente en el que se encuentra una cimentación profunda, sin que intervengan contaminantes. Se ha denominado "entorno" a este medio, para diferenciarlo respecto de los anteriores. Se enlistan a continuación algunos de estos cambios, cuyo tratamiento a detalle está fuera del alcance de este trabajo:

- Permafrost.
- Hundimiento regional.
- Hundimiento de la superficie.
- Agrietamiento.
- Colindancias.

## 4.7 Seguridad.

La construcción de cimentaciones y excavaciones profundas requiere de medidas de seguridad particulares durante su desarrollo.

Las ventajas que se obtienen al trabajar dentro de un ambiente en el que se cuidan y vigilan los aspectos de seguridad, son principalmente las de preservar la integridad de las personas que intervienen directamente en los trabajos, así como la de las personas que pueden estar cerca o dentro del área de ejecución; asimismo, se logra disminuir considerablemente el riesgo al que se someten los equipos de construcción.

Una correcta elección del procedimiento constructivo y del equipo por utilizar, disminuye la posibilidad de errores humanos durante las maniobras, mejorando la calidad de la obra que se construye, y reduciéndose los costos en la mayoría de los casos.

### **Maniobras generales.**

#### *a) Accesos y plataformas de trabajo*

Los equipos utilizados en obras de excavaciones y cimentaciones profundas requieren de accesos firmes y seguros, ya que se trata de maquinaria pesada que transita sobre orugas o neumáticos. No se debe trabajar sobre plataformas inestables, procurando apoyar los equipos lejos de las orillas de los hombros de los taludes.

#### *b) Obstáculos terrestres y/o aéreos*

La altura convencional de los equipos diseñados para la construcción de cimentaciones profundas es superior a los 20 m; antes de iniciar cualquier trabajo es necesario inspeccionar el lugar donde se desarrollarán, observando con especial atención los obstáculos terrestres y/o aéreos, que en la mayoría de los casos corresponden a instalaciones eléctricas o de algún otro tipo. En caso de que

los obstáculos mencionados existan, se debe proceder a solicitar la interrupción de los servicios.

Los trabajos deben ser organizados para evitar que el equipo golpee accidentalmente estructuras existentes dentro de la obra o adyacentes a la misma con el propósito de evitar su colapso o deterioro. Con lo anterior también se evitan las volcaduras de equipos provocados por las cargas y los nuevos puntos de apoyo, que modifican los centros de gravedad de los mismos.

#### *c) Cables*

Durante las maniobras de perforación e izaje se debe poner atención a los cables de acero usados en las maniobras, incluyendo su colocación, utilización, mantenimiento y revisión de accesorios.

#### *d) Grúas*

El sistema de freno de los tambores de la grúa debe estar en óptimas condiciones, ya que un descuido en su mantenimiento puede provocar perder el control de la maniobra de las cargas.

Es recomendable conocer las tablas que relacionan las capacidades de carga y longitudes e inclinaciones de las plumas de las grúas, para evitar que el equipo falle con alguna carga.

#### *e) Maniobras*

Durante las maniobras, ninguna persona debe permanecer debajo de la carga. Para el manejo y dirección de la posición de los armados, se recomienda utilizar cables de manila o polipropileno, que tengan la longitud suficiente que permita cumplir con el punto anterior.

#### *f) Cargas*

No es conveniente jalar cargas con la grúa, para evitar balanceos que puedan golpear la caseta donde se encuentra el operador, o bien el desplazamiento de la carga en otra dirección.

Durante las maniobras, se debe mantener la carga lo más cercano posible al suelo, evitando que el personal se encuentre sobre la misma.

### *g) Equipo*

- El personal no debe bajar ni subir de un equipo que esté en movimiento.
- Se deberá mantener limpio el parabrisas de las grúas para permitir siempre buena visibilidad.
- Los equipos deben estar provistos de andadores y escaleras adecuadas, para poder operar y/o supervisar adecuadamente su funcionamiento.
- Es deseable evitar el aire dentro de los sistemas hidráulicos para evitar fallas durante la maniobra.
- Antes de abrir alguna conexión o llave de algún sistema hidráulico para su revisión, se recomienda verificar que el sistema haya liberado la presión.
- Cuando el equipo esté funcionando, no es conveniente cargar combustible.
- La revisión de depósitos de combustible y de baterías debe realizarse utilizando lámparas sordas.

### **Colocación de materiales.**

#### *a) Acero de refuerzo*

Debido a que el acero de refuerzo ya habilitado debe ser maniobrado en condiciones diferentes a las del elemento diseñado por construir, es necesario conocer el comportamiento del armado al ser maniobrado.

Al introducir los armados dentro de la perforación para muro Milán o pilas, es necesario revisar que los estribos o zunchos estén debidamente amarrados para evitar que se desprendan durante la maniobra. Es recomendable también revisar que a lo largo del armado no se queden desperdicios de acero, así como herramienta de habilitado antes de realizar la maniobra.

Es necesario considerar la longitud de los armados para determinar la posible presencia de deformaciones que provoquen rotura de amarres. En el caso de esta obra, se resolverá este problema colocando rigidizadores en los armados.

Es muy peligroso caminar sobre el armado, ya que es muy probable que se ocasionen lesiones los trabajadores con las varillas o con el alambre recocado, siendo la fractura de tobillo el caso más común. Un rasguño de acero oxidado puede provocar una infección. El uso de andadores sobre los armados elimina estos riesgos y facilita el trabajo.

Otra ventaja que tiene el uso de andadores sobre el acero de refuerzo, es disminuir el tiempo de contacto del concreto fresco con la piel del trabajador, el cual le provoca irritaciones por quemadura volviendo a la piel más vulnerable a las infecciones.



## *b) Concreto*

En algunas cimentaciones se requiere de realizar los colados con bomba y pluma, debido a las dimensiones del terreno en el que se trabaja, el nivel en el cual se encuentra el equipo de cimentación, o la falta de acceso a la zona. En estas condiciones se debe revisar el correcto funcionamiento de las llaves en las uniones de la tubería, para evitar que el concreto se derrame cayendo junto con las mismas.

Las llaves están diseñadas para que al cerrar las palancas con la que los anillos abrazan a las tuberías, no requieran de gran esfuerzo, debiéndose sentir un jalón del broche en el sentido del cierre, evitando así que con la vibración se abran.

Cuando se utilicen depósitos portátiles para colocar el concreto, debe garantizarse que el soporte sea el adecuado para la carga y que el mecanismo de la compuerta trabaje correctamente, para evitar que el concreto caiga antes de llegar a donde se va a depositar. Esta maniobra debe realizarse con un manejo suave.

En el colado de las pilas y muro Milán es necesario que el personal esté alrededor de la perforación para manejar correctamente la tubería tremie, por lo que se debe contar con una estructura en la cual el trabajador pueda pararse y que evite su caída dentro de la perforación.

Esta estructura también garantiza la seguridad durante el acoplamiento de los tramos de tubería tremie.

No es recomendable tratar de abrir una conexión cuando el equipo esté en operación, ya que este trabaja con presiones y temperaturas altas, pudiendo provocar el vapor quemaduras y la conexión puede desprenderse con gran fuerza.

Los depósitos de agua deben estar alejados de la instalación eléctrica, la cual debe ser revisada por un especialista, para evitar algún corto circuito o peligro de electrocutamiento.

Los depósitos de combustible nunca deben localizarse en la parte superior del equipo, para evitar que alguna fuga caiga en superficies calientes, provocando un incendio o explosión.

## **Perforación.**

### *a) Brocales*

Para evitar caídos de material dentro de la excavación, es importante utilizar brocales de concreto, evitando así exponer a algún peligro a los trabajadores y al equipo que se encuentra adyacente a la perforación.

Se recomienda que el brocal utilizado para estos casos, quede empotrado en la perforación por lo menos dos veces su diámetro. En cuanto a la parte superior, es necesario que sobresalga de 30 a 40 *cm* (1 a 1.3 *ft*), como mínimo, del nivel de trabajo.

#### *b) Perforaciones adyacentes*

Es importante llevar a cabo una planeación en la ejecución de las perforaciones, para evitar hundimientos accidentales, los cuales son provocados por fallas en las paredes de las perforaciones o comunicación entre ellas al existir vibraciones en el suelo.

#### *c) Retiro de material*

El material producto de las excavaciones es muy inestable para el apoyo del equipo, debido a su estado suelto. Cuando se excava por debajo del NAF, el problema aún es mayor, ya que la superficie de trabajo se cubre de lodo.

Cuando se utilizan lodos bentoníticos para la estabilización de las paredes de las perforaciones, la plataforma de trabajo puede llegar a ser inestable y resbaladiza.

Cuando no se logran retirar eficientemente los lodos de la superficie, se debe tener cuidado en señalar y proteger los puntos donde se encuentren perforaciones abiertas.

#### *d) Descenso a perforaciones*

En algunos procedimientos constructivos, es necesario la construcción de campanas, o simplemente la inspección ocular del desplante de las perforaciones, para lo cual el personal deberá descender a su interior.

Es recomendable poner especial atención a la presencia de gases tóxicos o ausencia de aire respirable.

Antes de que se realice el descenso de un individuo, es deseable que se introduzca en la perforación un detector de aire enrarecido. No es recomendable arrojar objetos encendidos, para verificar si se apagan por la ausencia de oxígeno.

Debe elegirse el equipo de seguridad adecuado para cada emisión de gases en el sitio en particular, que puede variar entre una máscara con filtros, hasta equipo autónomo para respiración en presencia de aire enrarecido.

Se deberá evitar en lo posible el accionar motores de combustión dentro o adyacente a las perforaciones con el personal en su interior.

Cuando se requiera equipo de trabajo dentro de las perforaciones, se deberá organizar el descenso de tal forma que el personal sea el último que baje, para evitar que la caída libre de algún objeto golpee al personal.

El descenso de las cargas deberá realizarse con canastillas diseñadas especialmente para esta operación, evitándose dispositivos improvisados. El personal debe bajar sentado, con el equipo de seguridad que garantice su seguridad.

Los trabajadores dentro de una excavación siempre deben utilizar un arnés de seguridad, el cual se sujetará a un cable de rescate durante todo el tiempo que permanezca laborando en su interior. Estos trabajos se deben realizar con ayuda de compañeros en el exterior, para que en caso de algún accidente, exista conocimiento inmediato del mismo y se proceda al rescate.

El cable que se utilice dentro de las perforaciones nunca debe ser de henequén o similar, ya que este con la humedad puede degradarse.

#### *e) Excavaciones abiertas*

Es común que algunas zanjas queden abiertas temporalmente en cambios de turno, por lo que es recomendable utilizar tapas especiales que eviten la caída accidental de alguna persona.

En caso de que los trabajos continúen inmediatamente al finalizar la excavación, es suficiente con señalar el área.

## CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES.

Como podemos observar, durante el diseño y la ejecución de una excavación profunda, es de suma importancia conocer todos y cada uno de los aspectos referentes al proyecto, ya que en conjunto son necesarios para lograr el éxito en cada una de las etapas de su desarrollo; tanto en excavaciones a cielo abierto como las de tipo Top Down, el muro Milán ha probado ser una de las mejores opciones para los diseñadores y constructores, ya que funciona como elemento de retención del suelo ante la excavación y puede ser parte de la cimentación del inmueble a construir.

Con base en los análisis y estudios realizados, se propone ejecutar la lumbrera con geometría circular mediante el proceso constructivo de muro Milán estructural hasta los 48.10 m de profundidad, 35.10 m de diámetro interior, espesor de muro de 1.00 m y una cimentación profunda a base de pilas rectangulares desplantadas a -74.00 m, lo cual resulta adecuado para resistir las solicitaciones cuando esta se excava al nivel de proyecto, el cual es capaz de absorber las demandas de esfuerzos.

Para cumplir con la calidad y las características del proyecto, se requiere de una buena planeación y elegir correctamente la logística; así como tener en cuenta los programas de obra, la previsión de la maquinaria y equipos, materiales y personal, trabajos extraordinarios, gastos no previstos, trato y conciliación con el cliente, además de estar al día con los permisos de construcción, ya que esto en conjunto, nos llevará al éxito durante la ejecución de la obra.

Se sugiere que únicamente ingenieros que cuenten con la experiencia geotécnica-constructiva en este tipo de obras sean los responsables de los diferentes frentes de trabajo y de la ejecución de cada una de las actividades que el proyecto demanda. Se recomienda el uso correcto de la instrumentación durante el desarrollo de los trabajos, con el propósito de cuidar que lo analizado y diseñado se refleje realmente en obra; y en caso contrario, ayude a calibrar, corregir y mejorar futuros modelos.

Respecto a los materiales de obra, se deben exigir los certificados de calidad, así como tendrán que realizarse los ensayos pertinentes, verificando que estos se ejecuten correctamente. Un punto fundamental es contar con proveedores serios y responsables, y siempre tener una segunda opción en caso de imprevistos de fuerza mayor.

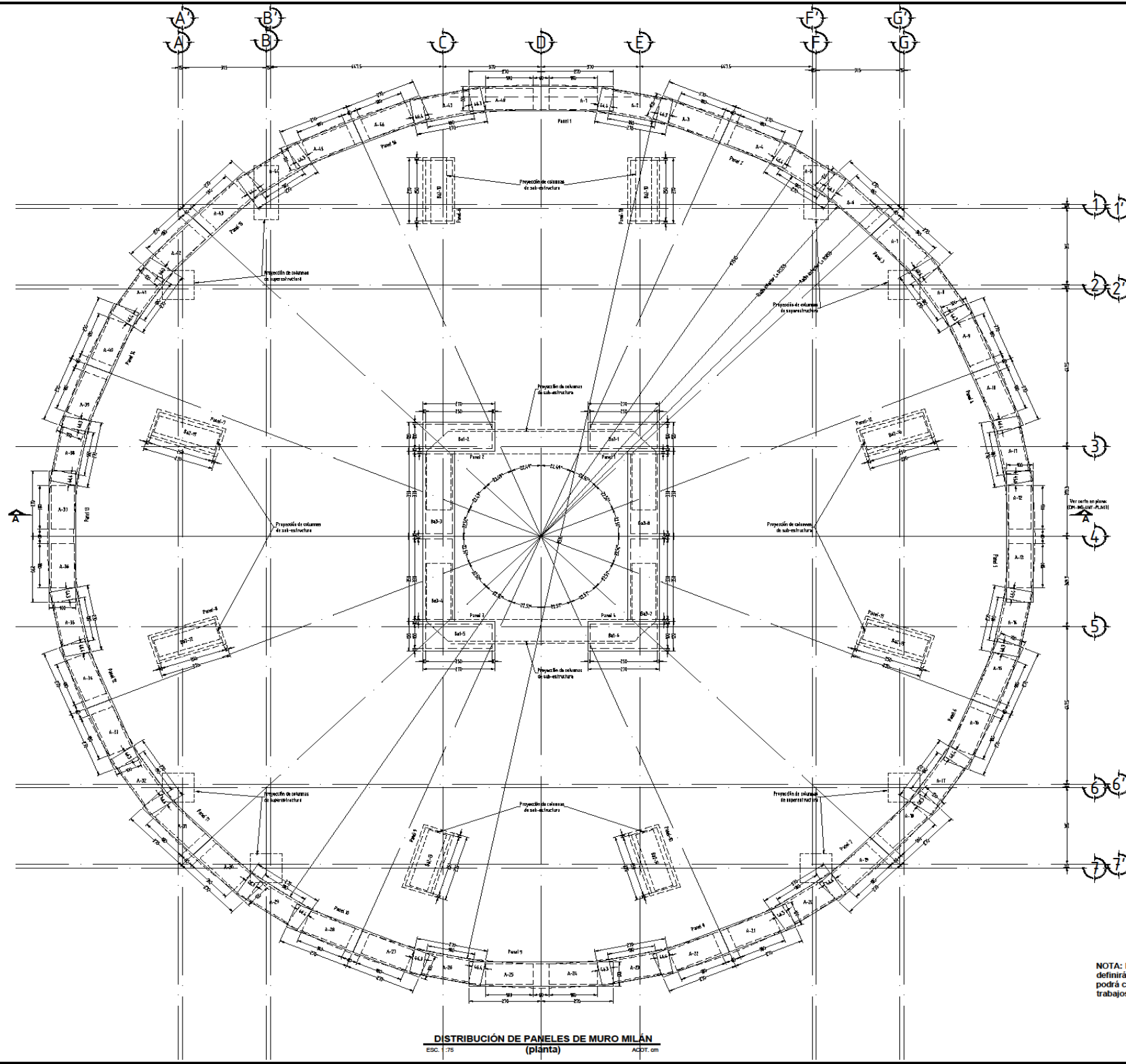
Se debe contar con un reglamento interno de seguridad estricto, cuidando que todo el personal cumpla con el uso del equipo de protección de acuerdo al trabajo que haya sido encomendado o que se encuentre realizando. En cuanto a la maquinaria; la revisión, inspección y certificación de grúas y elementos para izaje, tales como ganchos, pernos, eslingas, balancines, anillos, cadenas, cables de acero, entre otros, es imprescindible.

Todos los problemas que lleguen a surgir en obra pueden resolverse, siempre poniendo en primer lugar la integridad del personal y tomando decisiones con ética, cuidando la calidad humana, la imagen de la empresa y el profesionalismo del ingeniero.

Por último, la ejecución de proyectos de estas dimensiones no solo requiere los conocimientos de ingeniería geotécnica y de construcción, sino que depende en conjunto de los distintos ramos de la ingeniería civil, llámese ingeniería estructural, geodésica, hidráulica, ambiental, planeación, sistemas y demás campos de conocimiento; para garantizar la seguridad y funcionalidad de los inmuebles a fin de satisfacer las necesidades que actualmente la sociedad demanda.

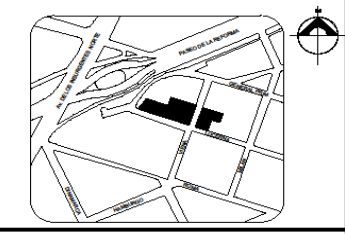
## **ANEXOS.**

### **ANEXO I. Planos del proyecto de excavación.**



**DISTRIBUCIÓN DE PANELES DE MURO MILÁN**  
(planta)  
ESC. 1/75 ACOT. cm

NOTA: La secuencia de ejecución de los paneles se definirá en obra antes de los inicios de los trabajos y podrá cambiar en función de la evolución de los trabajos o necesidades de la obra.



CROQUIS DE LOCALIZACIÓN

**NOTAS**

**GENERALES**

**ESPECIFICACIONES CONSTRUCTIVAS**

**EQUIPO DE EXCAVACIÓN PARA MURO MILÁN Y BARRIETES**

- 1) La excavación de zanjas para muro Milán y Barrietes deberá realizarse con equipo semirrigado usando almeja hidráulica accionada con una unidad de potencia de por lo menos 250 HP y equipado con trípode para lechada y conexión de desviaciones con respecto a la vertical con una precisión de 1.0%, montado sobre una grúa de por lo menos 100 l de capacidad.
- 2) El equipo de excavación deberá permitir la rectificación rápida de la verticalidad y el centrado constante y tipo de la herramienta de corte en posición de excavación.
- 3) La tolerancia máxima de desviación horizontal como porcentaje de la distancia vertical en la excavación de los muros es de 0.4%.

**LODO BENTONITICO**

- 1) La excavación de zanjas para muro Milán y Barrietes deberá realizarse bajo lodo bentonítico.
- 2) Durante la excavación se deberá garantizar una carga de lodo de al menos 1.5 m sobre el Nivel de Aguas Freáticas (N.A.F.).
- 3) El lodo bentonítico tendrá las funciones de estabilizar la perforación, recuperar el material producto de la excavación y evitar la herramienta de perforación.
- 4) El lodo bentonítico consistirá en una mezcla coloidal estable de bentonita sodica en polvo con agua con un contenido máximo de sales totales estables de bentonita sodica por metro cúbico que se usará bentonita especial compatible con agua salada y aditivos químicos.
- 5) Durante la perforación y previo al estado del elemento, se deberán garantizar los siguientes parámetros para el lodo bentonítico:

Parámetro	Lodo nuevo	Antes del colado
Viscosidad Marsh (s)	33-40	33-50
Densidad	1.02-1.05	+1.15
Cabe (mm)	<1	<3
pH	7-10	7-11
Contenido arena (%)	0	<3

- 6) Se deberán monitorear y registrar estos parámetros durante la ejecución de los trabajos. La medición de estos parámetros debe estar normalizada de acuerdo con el American Petroleum Institute "API".
- 7) El sistema de circulación de lodos debe incluir equipo de regeneración para retirar arenas procedentes de la excavación.
- 8) El equipo de desarenado deberá tener una capacidad mínima de 100 m³/hr.
- 9) Se deberá contar con un mezclador hidráulico para producir la mezcla coloidal homogénea en suspensión de agua y bentonita.
- 10) Deberá instalarse un dispositivo de saturación de todos los hidratos con capacidad suficiente para alimentar, sin interrupciones, el consumo requerido durante la maniobra de excavación, más un interponedor adicional para compensar posibles pérdidas de lodo.

**JUNTAS ENTRE PANELES DE MURO MILÁN**

- 1) En la unión entre paneles adyacentes, deberá colocarse una junta tipo CWISB o similar, de forma tal que se garantice la continuidad del muro, así como la estanqueidad del mismo.

**MATERIALES**

- a) Se empleará concreto estructural clase 1, f<sub>c</sub>=400 kg/cm² en Muro Milán; con un módulo de elasticidad 28000 kg/cm², peso volumétrico para el concreto simple en estado fresco será superior a 2.2 tm³.
- b) Se empleará concreto estructural clase 1, f<sub>c</sub>=350 kg/cm² en Barrietes; con un módulo de elasticidad 261916 kg/cm², peso volumétrico para el concreto simple en estado fresco será superior a 2.2 tm³.
- c) El concreto para Muro Milán tendrá al menos 375 kg de cemento por m³.
- d) El acero de refuerzo tendrá un esfuerzo de fluencia f<sub>y</sub>=4200 kg/cm².
- e) El módulo de elasticidad del acero será de 2.1x10<sup>10</sup> kg/cm².
- f) Se empleará concreto estructural, f<sub>c</sub>=200 kg/cm² en Brocales, con un módulo de elasticidad 113137.05 kg/cm², peso volumétrico para el concreto simple en estado fresco será superior a 2.2 tm³.

**GENERALES**

- a) Niveles en metros.
- b) Verificar cotas y niveles en planos Arquitectónicos.
- c) Las cotas rigen al grupo.
- d) Verificar anchos de armado y de paneles en planos de armado de muros.
- e) La separación lateral de varillas mostrada en los planos puede tener pequeñas variaciones de acuerdo al habilitado de los estribos en obra.

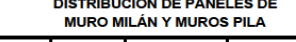
**ESTE PLANO SE RELACIONA CON LOS PLANOS DE TALLER DE CIMESA:**

- CIM-ING-UNT-PLA01 Trazo de Brocales.
- CIM-ING-UNT-PLA02 Ubicación de Pre-inyecciones en Muro Milán y Barrietes.
- CIM-ING-UNT-PLA03 Cota Ingresos A.A.
- CIM-ING-UNT-PLA04 Desarrollo de Paneles de muro Milán
- CIM-ING-UNT-PLA05 Armado de Muro Milán tipo A.
- CIM-ING-UNT-PLA06 Ubicación de Barrietes, orientación profunda (Planta).
- CIM-ING-UNT-PLA07 Refuerzo de Barrietes tipo B&D
- CIM-ING-UNT-PLA08 Refuerzo de Barrietes tipo B&D
- CIM-ING-UNT-PLA09 Refuerzo de Barrietes tipo B&D
- CIM-ING-UNT-PLA10 Refuerzo de Losa de Fondo
- CIM-ING-UNT-PLA11 Refuerzo en Trabe de Coronamiento
- CIM-ING-UNT-PLA12 Ubicación de pozos de bombeo (Planta)

**ABREVIATURAS**

- N.- Nivel
- N.C.S.- Nivel de Concreto Sano de Muro
- N.D.M.M.- Nivel de Desplante de Muro Milán
- N.D.B.- Nivel Desplante de Barriete
- N.M.E.- Nivel Máximo de Excavación
- N.P.T.- Nivel de Perfilado de Trabajo
- N.B.- Nivel de Brocales
- N.L.S.L.F.- Nivel Lecho Superior Losa de Fondo
- N.L.S.R.- Nivel Lecho Superior de Refuerzo
- N.L.I.R.- Nivel Lecho Inferior de Refuerzo

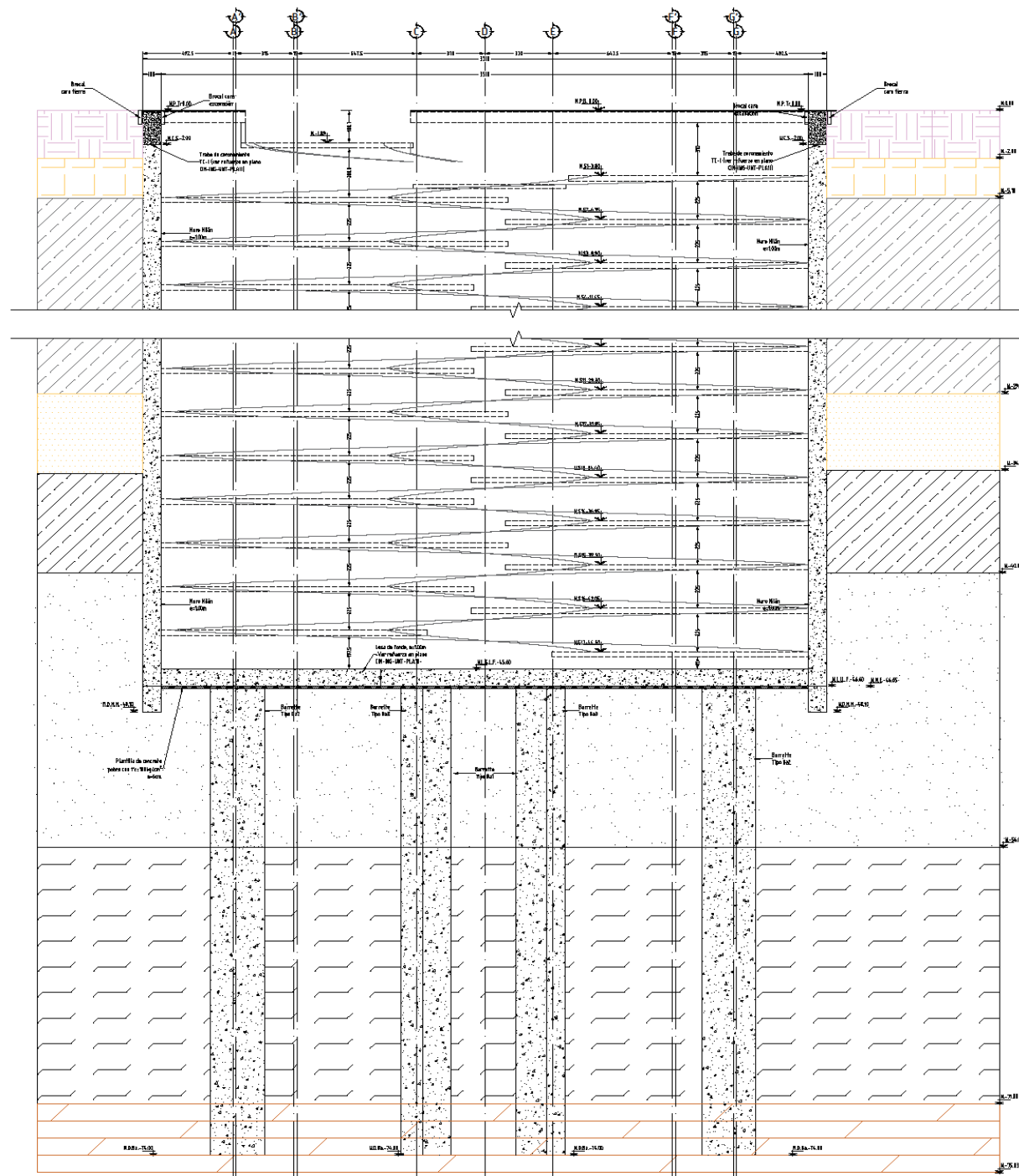
REV.	DESCRIPCIÓN	FECHA
C	Se modifica la ubicación y las dimensiones de los Barrietes perimetrales y se agregan los Brocales perimetrales y niveles de desplante de Muro Milán	27/11/18
B	Replanteo de Muro Milán	19/09/18
A	Primera edición para revisión del cliente	08/05/18



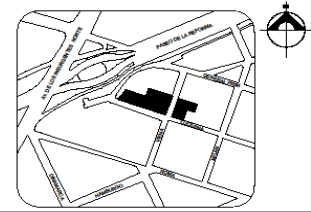
**UNIVERSITY TOWER**  
Av. Paseo de la Reforma s/n. Calle Lucerna y Viena Col. Juárez, Del. Cuauhtémoc, C.P. 06600, Ciudad de México, México

**DISTRIBUCIÓN DE PANELES DE MURO MILÁN Y MUROS PILA**

DISEÑO:	DIBUJO:	FECHA:	ESCALA:
J.D.G.	R.M.A.	Noviembre/18	1/75
REVISO:	APROBADO:	PLANO:	
J.P.A.		CIM-ING-UNT-PLA02	



**CORTE TRANSVERSAL A.A**  
 Elev. en m.  
 Viene de plano CIM-ING-UNT-PLA02.



**CROQUIS DE LOCALIZACION**

**ESPECIFICACIONES CONSTRUCTIVAS**

**EQUIPO DE EXCAVACION PARA MURO MILAN Y BARRETTES**  
 1) La excavación de zanjas para muro Milán y Barrettes deberá realizarse con equipo semirrigado usando almeja hidráulica accionada con una unidad de potencia de por lo menos 200 HP y equipada con inclinómetro para lectura y corrección de desviaciones con respecto a la vertical con una precisión de 1.0%, montado sobre una grúa de por lo menos 100 Lbs de capacidad.  
 2) El equipo de excavación deberá permitir la modificación rápida de la verticalidad y el vertido constante y fino de la herramienta de corte en posición de excavación.  
 3) La tolerancia máxima de desviación horizontal como porcentaje de la distancia vertical en la excavación de los muros es de 0.4%.

**LODO BENTONITICO**  
 1) La excavación de zanjas para muro Milán y Barrettes deberá realizarse bajo todo bentonítico.  
 2) Durante la excavación se deberá garantizar una carga de todo de al menos 1.5 m sobre el Nivel de Aguas Freaticas (N.A.F.).  
 3) El lodo bentonítico tendrá las funciones de estabilizar la perforación, recuperar el material producto de la excavación y embalar la herramienta de perforación.  
 4) El lodo bentonítico consistirá en una mezcla cohesiva estable de bentonita sodica en polvo con agua con un contenido máximo de sales totales inferior a 100 partes por millón (ppm) que se diluya bentonita especial compatible con agua salobra y aditivos químicos.  
 5) Durante la perforación y previo al estado del elemento, se deberán garantizar los siguientes parámetros para el lodo bentonítico:

Parámetro	Lodo nuevo	Antes del colado
Viscosidad Marsh (s)	33-40	33-50
Densidad	1.02-1.05	1.1-1.15
Cable (mm)	<1	<3
PH	7-10	7-11
Contenido arena (%)	0	<3

6) Se deberán monitorear y registrar estos parámetros durante la ejecución de los trabajos. La medición de estos parámetros debe estar normalizada de acuerdo con el American Petroleum Institute "API".  
 7) El sistema de bombeo de lodo debe incluir equipo de regeneración para retirar arenas procedentes de la excavación.  
 8) El equipo de desarenado deberá tener una capacidad mínima de 100 m<sup>3</sup>.  
 9) Se deberá contar con un mezclador hidráulico para producir la mezcla cohesiva homogénea en suspensión de agua y bentonita.  
 10) Deberá instalarse un depósito de saturación de todos los trabajos con capacidad suficiente para almacenar, sin interrupciones, el consumo requerido durante la mano de obra de excavación, más un volumen adicional para compensar posibles pérdidas de lodo.

**JUNTAS ENTRE PANELES DE MURO MILAN**  
 1) En la unión entre paneles adyacentes, deberá colocarse una junta tipo CW56 o similar, de forma tal que se garantice la continuidad del muro, así como la estanqueidad del mismo.

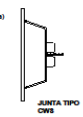
**MATERIALES**  
 a) Se empleará concreto estructural clase 1, f<sub>c</sub>=400 kg/cm<sup>2</sup> en Muro Milán; con un módulo de elasticidad 28000 kg/cm<sup>2</sup>, peso volumétrico para el concreto simple en estado fresco será superior a 2.2 t/m<sup>3</sup>.  
 b) Se empleará concreto estructural clase 1, f<sub>c</sub>=350 kg/cm<sup>2</sup> en Barrettes; con un módulo de elasticidad 20 000 kg/cm<sup>2</sup>, peso volumétrico para el concreto simple en estado fresco será superior a 2.2 t/m<sup>3</sup>.  
 c) El concreto para Muro Milán tendrá al menos 375kg de cemento por m<sup>3</sup>.  
 d) El acero de refuerzo tendrá un esfuerzo de fluencia f<sub>y</sub>=4200 kg/cm<sup>2</sup>.  
 e) El módulo de elasticidad del acero será de 2.1x10<sup>6</sup> kg/cm<sup>2</sup>.  
 f) Se empleará concreto estructural, f<sub>c</sub>=200 kg/cm<sup>2</sup> en fideles; con un módulo de elasticidad 113137.28 kg/cm<sup>2</sup>, peso volumétrico para el concreto simple en estado fresco será superior a 2.2 t/m<sup>3</sup>.

**GENERALES**  
 a) Niveles en metros.  
 b) Verificar cotas y niveles en planos Arquitectónicos.  
 c) Las cotas deben ser al dibujo.  
 d) Verificar anchos de armado y de paneles en planos de armado de muros.  
 e) La separación mínima de varillas mostrada en los planos puede tener pequeñas variaciones de acuerdo al hábito de los constructores en obra.

**ESTE PLANO SE RELACIONA CON LOS PLANOS DE TALLER DE CIMESA:**  
 CIM-ING-UNT-PLA01 Trazo de Brincales.  
 CIM-ING-UNT-PLA02 Ubicación de Pre-espaldones en Muro Milán y muros Pisos (Barrettes).  
 CIM-ING-UNT-PLA03 Distribución de Paneles y Barrettes.  
 CIM-ING-UNT-PLA04 Desmoldo de Paneles de muro Milán.  
 CIM-ING-UNT-PLA05 Armado de Muro Milán tipo A.  
 CIM-ING-UNT-PLA06 Ubicación de Barrettes, cimentación profunda (Pantón).  
 CIM-ING-UNT-PLA07 Refuerzo de Barrettes tipo B(a).  
 CIM-ING-UNT-PLA08 Refuerzo de Barrettes tipo B(a).  
 CIM-ING-UNT-PLA09 Refuerzo de Barrettes tipo B(a).  
 CIM-ING-UNT-PLA10 Refuerzo de Losa de Fondo.  
 CIM-ING-UNT-PLA11 Refuerzo en Trabe de Concreto.  
 CIM-ING-UNT-PLA12 Ubicación de pozos de bombeo (Pantón).

**ABREVIATURAS**

N.-	Nivel
N.C.S.-	Nivel de Concreto Cero de Muro
N.D.M.M.-	Nivel de Desplante de Muro Milán
N.D.S.M.-	Nivel de Desplante de Barrete
N.M.E.-	Nivel Máximo de Excavación
N.P.T.-	Nivel de Plataforma de Trabajo
N.E.-	Nivel de Brincales
N.L.S.L.F.-	Nivel Lecho Superior Losa de Fondo
N.L.S.R.-	Nivel Lecho Superior de Refuerzo
N.L.L.R.-	Nivel Lecho Inferior de Refuerzo



REV.	DESCRIPCION	FECHA
C	Se modifica la ubicación y las dimensiones de los Barrettes perimetrales	27/11/18
B	Se modifican el nivel de desplante de Muro Milán	18/08/18
A	Primera revisión para revisión del cliente	08/06/18

**CIMESA** UNIVERSITY TOWER  
 Av. Paseo de la Reforma s/n. Calle Loserza y Viena Col. Juárez, Del. Cuauhtémoc, C.P. 06600, Ciudad de México, México

**CORTE TRANSVERSAL A.A**

DISEÑO:	DIBUJO:	FECHA:	ESCALA:
E.D.B.	R.M.A.	Noviembre/18	1/20
REVISÓ:	APROBÓ:	PLANO:	
J.P.A.		CIM-ING-UNT-PLA03	

## REFERENCIAS.

- American Petroleum Institute - Field Testing Water - Based Drilling Fluids.
- A. Momnet (1994), Sif Bachy, "Module de réaction coefficient de décompression, au sujet des paramètres utilisés dans la méthode de calcul elasto-plastique des soutènements", Revue Française de Géotechnique, 1er trimestre.
- E. Dodel, P. Schmitt, G. Simon (2002), "Active and passive earth pressure: A new approach for an old concept", Soletanche-Bachy, Paris. Fifth European Conference on "Numerical Methods in Geotechnical Engineering" - NUMGE 2002, Paris, France, 4-6 September.
- E. Tamez.- *"Ingeniería de Cimentaciones: "Conceptos Básicos de la Practica"*.- TGC Geotecnia, S.A. de C.V. 2001.
- González Domínguez, Etienne (2013). *Análisis y diseño de una cimentación profunda a base de pilas y muros Milán de un rascacielos en el valle de México*. (Tesis de Licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México (U.N.A.M.), Ciudad de México.
- Gutiérrez Sotelo, Alfredo Martín (2010). *Procedimiento de construcción de la estación Mexicalzingo de la línea 12 del metro* (Tesis de Licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México (U.N.A.M.), Ciudad de México.
- Ing. Callejas Quezada, Francisco Israel (2011). *Procedimiento constructivo de muro pantalla* (Tesis de Especialidad). Universidad Nacional Autónoma de México (U.N.A.M.), Ciudad de México.
- Ing. Morales Angulo, Sergio Gabriel (2017). *Análisis comparativo de métodos de diseño geotécnico de excavaciones profundas* (Tesis de Maestría). Universidad Nacional Autónoma de México (U.N.A.M.), Ciudad de México.
- Juárez, E. Rico A., "Mecánica de Suelos Tomo 2, Aplicaciones de la mecánica de suelos", Ed. Limusa, México, 1963.
- Juárez, E. y Rico A., "Mecánica de Suelos Tomo 3, Flujo de agua en suelos", Ed. Limusa, México, 1963.



- LCPC (1984), “Recommandations pour le choix des paramètres de calcul des écrans de soutènement par la méthode aux modules de réaction”. Note d’information technique, Ministère de l’urbanisme, du logement et des transports, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Juillet.
- Luc Delattre (2001), “Un siècle de méthodes de calcul d’écrans de soutènement”. I. L’approche par le calcul – les méthodes classiques et la méthode au coefficient de réaction, Bulletin des Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Septembre – Octobre.
- Manual de Cimentaciones Profundas (2001), Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, A.C.
- Manual de Construcción Geotécnica. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos. 2002.
- Manual de Diseño de Obras Civiles, Geotecnia Y Mecánica de Suelos. CFE, México (1983).
- Manual de Diseño Geotécnico, Volumen 1, Covitur, Departamento del Distrito Federal Secretaría General de Obras, agosto de 1987.
- Marsal, R. J. y Mazari, M. (1962), "El Subsuelo de la Ciudad de México", Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Martínez Moran, Marco Antonio (2012). *Procedimiento constructivo del muro Milán Lumbrera 19 - Túnel Emisor Oriente* (Tesis de Licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México (U.N.A.M.), Ciudad de México.
- Mecánica de Suelos, Tomo 2. Juárez Badillo, Rico Rodríguez, editorial LIMUSA S.A. de C.V., edición año 2000.
- "Mejoramiento de suelos", CIMESA, Grupo Soletanche Freyssinet.
- Norma ASTM D1586-11 y ASTM D5778-07.
- Norma NF EN 1538:”Execution of special geotechnical work Diaphragm walls”. October 2010.
- “Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Cimentaciones RCCDMX”. Gaceta Oficial de la Ciudad de México. Diciembre, 2017.

- “Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto del RCCDMX”. Gaceta Oficial de la Ciudad de México. Diciembre, 2017.
- Ou, C.Y., “*Deep excavation*”, Taylor & Francis Group, London, 2006.
- Paulín Aguirre, Juan. "Apuntes y visitas a obra en el curso de Construcción de Obras Subterráneas y Cimentaciones". Programa Único de Especializaciones en Ingeniería, Facultad de Ingeniería, U.N.A.M. Ciudad de México. 29-enero-2018 al 28-mayo-2018.
- Paulín Aguirre, Juan. "Excavaciones Urbanas Profundas". Sistemas de contención en excavaciones profundas para edificaciones. 30-septiembre-2016.
- P. Schmitt (1995), “Méthode empirique d'évaluation du coefficient de réaction du sol vis-à-vis des ouvrages de soutènement souples”, Soletanche., Revue Française de Géotechnique, 2e trimestre.
- P. Schmitt (1998), “De l'élasticité linéaire au coefficient de réaction: théories, observations et ordres de grandeur”, Revue Française de Géotechnique, 4e trimestre.
- Planos del proyecto de excavación:
  - \* CIM-ING-UNT-PLA02. Distribución de paneles de muro Milán y muros pila.
  - \* CIM-ING-UNT-PLA03. Corte transversal A-A.
- Programa PARIS para análisis de excavaciones con base en interacción suelo-estructura desarrollado por el Grupo Soletanche-Bachy, versión W2011m.
- Programa *SAP2000* Ultimate v20.1.0 Desarrollado por Computers and Structures, Inc. Berkeley, CA.
- Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos (1978), “*El Subsuelo y la Ingeniería de Cimentaciones en el Área Urbana del Valle de México*”, Simposio, México.
- Terzaghi, K. and Peck, R. B. (1967), *Soil Mechanics in Engineering Practice*, John Wiley & Sons, New York.
- Yepes Piqueras, V. (2016). Procedimientos de construcción de cimentaciones y estructuras de contención. Valencia: Universitat Politècnica de València.

- Zeevaert, L, *Foundation Engineering for Difficult Subsoil Conditions*, Van Nostrand Reinhold, 1973.
- Zonificación Geosísmica en México y su Aplicación al Cálculo de Espectros de Diseño. Miguel P. Romo y Efraín Ovando. Instituto de Ingeniería, U.N.A.M.