



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Proceso constructivo de la
cimentación del proyecto
University Tower**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Civil

P R E S E N T A

Miguel Alejandro Colin Conde

DIRECTOR DE TESIS

Ing. Heriberto Esquivel Castellanos



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019

ÍNDICE

0. Introducción.....	5
0.1 Objetivo.....	5
0.2 Alcances.....	5
0.3 Justificación de la tesis.....	6
0.4 Marco Legal.....	7
1. Generalidades.....	11
1.1. Geología de la Cuenca de la Ciudad de México.....	11
1.2 Zonificación estratigráfica.....	17
1.3 Cimentaciones.....	19
1.3.1 Clasificación de cimentaciones.....	21
1.4 Muro Milán.....	30
1.4.1 Ventajas del procedimiento.....	30
1.4.2 Diseño de Muro Milán.....	30
1.4.3 Experiencias del Muro Milán en México.....	34
1.4.4 El papel de los lodos bentoníticos.....	37
1.4.5 Materiales.....	41
1.4.6 Anclaje.....	42
1.5 Lumbreras.....	46
1.6 Sistema de Top Down.....	51
1.7 Cimentaciones de edificios altos en la Zona Centro de la Ciudad de México.....	52
1.7.1 Ejemplo 1 Torre Latinoamericana.....	53
1.7.2 Ejemplo 2 Torre Mayor.....	56
1.7.3 Ejemplo 3 Torre Reforma.....	59
1.7.4 Ejemplo 4 Down Town Santa Fe.....	60
1.8 Medidas de Seguridad.....	63
1.8.1 Obligaciones del patrón y trabajadores.....	63
1.8.2 Equipo de protección.....	64
1.8.3 Seguridad en excavaciones.....	67

1.8.4	Señalización.....	68
1.9	Control de calidad.....	69
1.9.1	Lodos bentoníticos	69
1.9.2	Concreto.....	76
1.9.3	Acero de refuerzo.....	79
2	Descripción del proyecto University Tower.....	82
2.2	Estratigrafía del sitio y condiciones piezométricas.....	83
2.3	Descripción de la subestructura.....	89
3	Proceso Constructivo de la subestructura.....	93
3.1	Materiales.....	93
3.2	Preliminares.....	94
3.2.1	Limpieza del terreno.....	94
3.2.2	Trazo y nivelación	95
3.2.3	Colocación de instalación provisionales.....	98
3.3	Muros Milán de la lumbrera.....	100
3.3.1	Brocales	101
3.3.2	Excavación de paneles de Muro Milán.....	103
3.3.3	Aplicación de lodos bentoníticos.....	106
3.3.4	Juntas CWS	107
3.3.5	Colocación de acero de refuerzo	111
3.3.6	Vaciado del concreto fresco.....	116
3.4	Barrettes.....	121
3.4.1	Excavación	121
3.4.2	Juntas.....	122
3.4.3	Armado.....	122
3.4.4	Vaciado de concreto fresco.....	123
3.5	Trabe de coronamiento.....	125
3.5.1	Descabece de lumbrera	125
3.5.2	Acero de refuerzo.....	127
3.5.3	Construcción de ménsulas.....	129
3.5.4	Vaciado de concreto de la ménsula	132

3.6	Excavación del núcleo.....	135
3.6.1	Instalación de plataformas.	135
4.	Medidas de seguridad durante la construcción de la obra.....	142
4.1	Señalización	142
4.2	Seguridad en excavaciones.	144
4.3	Necesidad de limitar áreas.....	145
4.4	Mantenimiento a maquinaria.	146
4.5	Equipo de seguridad.....	147
5.	Control de calidad en la obra.	148
5.1	Pruebas de lodos Bentoníticos.....	148
5.1.1	Prueba de viscosidad.	148
5.1.2	Prueba de masa volumétrica.....	149
5.1.3	Prueba de contenido de arena.....	150
5.1.4	Prueba de espesor de película impermeable y filtración.	150
5.1.5	PH.....	152
5.2	Pruebas del concreto.....	152
5.3	Pruebas en el acero.	153
6.	Conclusión.....	155

0. Introducción.

0.1 Objetivo.

El objetivo de este trabajo es describir y analizar el proceso constructivo utilizado en la cimentación del proyecto: University Tower. Dicha torre está compuesta por 58 niveles de oficinas y 17.5 sótanos de estacionamiento.

0.2 Alcances.

Para poder describir el proceso constructivo, es necesario considerar los siguientes capítulos.

Capítulo 1 Generalidades. Primero se nombrarán antecedentes, describiendo así la geología, estratigrafía y zonificación de la Ciudad de México. Teniendo como base esta información se plasmará teoría sobre cimentaciones, haciendo hincapié en las profundas. Otro punto a considerar son los aspectos generales de los elementos de la subestructura, como la lumbrera a base de muros Milán, así como la importancia de lodos bentoníticos en este tipo de proyectos.

Se comentarán sistemas de retención de paredes en una excavación y otras alternativas usadas en edificación. Para ilustrar este capítulo se describirán algunos rascacielos en la Ciudad de México con una subestructura con características similares a las del proyecto.

Además, se explicarán medidas de seguridad establecidas en la NORMA Oficial Mexicana NOM-031-STPS-2011 y se estudiará la forma de tener un control de calidad de manera general de los materiales más utilizados en la construcción del proyecto como el concreto, acero de refuerzo y lodos bentoníticos.

Capítulo 2 Descripción del proyecto University. Tower. Se enunciarán características generales y detalles de la subestructura considerando además aspectos geológicos y geotécnicos del sitio.

Capítulo 3 Proceso Constructivo de la subestructura. Se describirá ampliamente la construcción de cada uno de los elementos de la subestructura: Muro Milán utilizado en la lumbrera, barretes, trabe de coronamiento, también se incluirán la excavación del núcleo y las etapas que esta conlleva.

Capítulo 4 Medidas de seguridad. Se analizarán ciertas precauciones que se deben seguir en toda obra de alto riesgo y las medidas particulares.

Capítulo 5 Control de calidad. Se estudiará la forma en que se aplica el control de calidad en el desarrollo de la obra.

Capítulo 6 Conclusiones. Finalmente, al haber analizado aspectos teóricos y prácticos de la construcción, se realizará una reflexión.

0.3 Justificación de la tesis.

Este proyecto de tesis se centrará en estudiar la construcción de la subestructura del proyecto University Tower. Es uno de los campos que componen la ingeniería civil. Dichos campos se enuncian a continuación:

- Investigación.
- Desarrollo o Investigación Aplicada.
- Planeación.
- Diseño.
- Construcción.
- Operación.
- Mantenimiento.

De estos campos se considera a la construcción, como uno de los más importantes. Es el último en el que se puede incluir un control de calidad antes de que se lleve a cabo la operación y el mantenimiento del proyecto. Además, aquí se materializan las ideas que en el diseño se expresaron y como producto se llegaron a planos y especificaciones. ¹

¹ Mendoza E. (1980) Introducción al proceso constructivo. FUNDEC, México, pp.84.

En la construcción, es necesario que el especialista que la esté dirigiendo tenga una preparación completa en todas las ramas de la ingeniería civil para que tenga una idea general de lo que se espera en la construcción. Es por eso que tiene que estar relacionándose con grupos de otras especialidades para fijar puntos en beneficio del proyecto.

Es evidente que para que una estructura ofrezca seguridad estructural y se comporte correctamente ha de llevar una cimentación adecuada. Su construcción es, a veces, el trabajo más difícil de todos los que se presentan al realizar un proyecto.

Para que un proyecto pueda desarrollarse adecuadamente con el consentimiento de las autoridades, es necesario cumplir con la normatividad necesaria.¹

0.4 Marco Legal.

En esta sección se explicarán algunas de las normas y leyes más importantes que componen el marco legal para la construcción del proyecto University Tower.

A nivel federal para llevar a cabo proyectos de este tipo es necesario considerar lo siguiente:

El edificio que se muestra en la *Ilustración 1*, cuenta con características históricas y artísticas, aplica la “Ley Federal Sobre Monumentos y Zonas Arqueológicas, Artísticas e Históricas”, por lo tanto, es necesario contar con un “Visto Bueno del Instituto Nacional de Antropología e Historia” para la demolición del Salón de Eventos, que se encontraba en la parte trasera del predio.²

² Diario Oficial de la Federación. Ley Federal sobre Monumentos y Zonas Arqueológica. [citado 2019-04-10]. [En línea]. Disponible en: <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio>



Ilustración 1 Casona construida a finales del s.XIX.³

En la Ciudad de México, se deben considerar la siguiente normatividad para la construcción de un proyecto. A continuación, se muestran algunas de las más relevantes:

- Ley de Desarrollo Urbano del Distrito Federal.

Así como su respectivo reglamento. En dicha ley se enuncian las acciones necesarias sobre el ordenamiento territorial y desarrollo urbano en la Ciudad de México. De acuerdo a esta ley se deben cumplir con trámites, algunos de los cuales se enuncian a continuación:

- Expedición de Alineamiento y Número Oficial

En este trámite, se asigna un número oficial para cada predio que tenga frente a la vía pública, este número debe colocarse en un lugar que se pueda ver a una distancia de 20 metros.

- Certificado Único de Zonificación de Uso del Suelo

En este documento, se demuestra para que está disponible un determinado predio.²

3 Fierro R. (2015). Casas Grandes de México. [citado 2019-04-10]. [En línea]. Disponible en: <https://grandescasasdemexico.blogspot.com>.

- Trámite Constitución de Polígono de Actuación

El trámite demuestra si el proyecto que se planea realizar ahí, cuenta con la aprobación de las autoridades de acuerdo al uso de suelo y al Programa de Desarrollo Urbano.⁴

- Vo.Bo. Patrimonio Cultural Urbano SEDUVI

El visto bueno del Patrimonio Cultural Urbano es un documento que se obtiene antes de tramitar la licencia de construcción. Este trámite aplica cuando los edificios localizados en un área de conservación patrimonial son sometidos a una ampliación, instalación o reparación.

- Ley Ambiental de Protección a la Tierra en el Distrito Federal.

Con esta legislación se cubren los aspectos ambientales de la construcción. Al aplicarse esta ley se deben cumplir con el trámite que se explica a continuación:

- Declaratoria de Impacto Ambiental.

En dicho trámite previo a la construcción del proyecto, se da un informe preventivo, de un estudio de riesgo o de una evaluación ambiental estratégica. En la obra existió una brigada especializada para que se cumpliera el reglamento en torno a las medidas ambientales.⁵

En la *Ilustración 2*, se puede ver la protección a los árboles que se encontraban antes de comenzar la obra, garantizando las medidas ambientales en el sitio.

4 Gaceta Oficial del Distrito Federal. Ley de Desarrollo Urbano del Distrito Federal. [citado 2019-04-10]. [En línea]. Disponible en: www.aldf.gob.mx/

5 "Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente". Gaceta Oficial del Distrito Federal. Enero, 1988.

En la Ciudad de México, el Reglamento para las Construcciones del Distrito Federal las regula de acuerdo a las siguientes normas complementarias:⁶

- Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones.

En dichas normas se enuncian criterios sobre estudios, sondeos y procesos constructivos incluyendo cimentaciones someras y profundas, excavaciones y muros de contención.

- Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto.

De igual manera que en las normas mencionadas en el párrafo anterior, se exponen criterios de análisis y diseño para la construcción de estructuras de concreto.



*Ilustración 2 Protección a árboles ya existentes en la obra.*⁷

A nivel municipal, se debe cumplir con:

- Licencia de Construcción Especial.

La licencia de construcción especial es uno de los más importantes trámites, para poder construir, modificar o hacer demoliciones, como es el caso del proyecto University Tower.⁴

⁶ Gaceta Oficial del Distrito Federal. Reglamento para las Construcciones del Distrito Federal. [citado 2019-04-10]. [En línea]. Disponible en: www.aldf.gob.mx/

⁷ Fotografía tomada en obra.

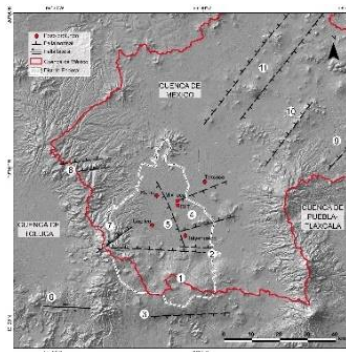
1. Generalidades.

1.1. Geología de la Cuenca de la Ciudad de México.

La Cuenca del Valle de México se formó después de una época de intensa actividad volcánica, en la cual fueron apareciendo las siguientes sierras:

- Sierra de Chichinautzin.
- Sierra de las Cruces.
- Sierra de Guadalupe.
- Sierra de Tepotzotlán.
- Sierra de Tezontlalpan.
- Sierra de Pitallas.
- Sierra de Pachuca.
- Sierra de Tepozan.
- Sierra de Río Frío.
- Sierra Nevada.

En la *Ilustración 3*, se puede apreciar una vista satelital de la cuenca donde se encuentra la Ciudad de México con las sierras mencionadas anteriormente y su ubicación geográfica.⁸



*Ilustración 3 Modelo de elevación de la Cuenca de México.*⁹

8 Del Castillo R. (1978) Simposio Sobre el Subsuelo y la Ingeniería de Cimentaciones en el Área Urbana del Valle de México, El subsuelo y la ingeniería de cimentaciones en el área urbana del Valle de México. SMMS. pp 263.

9 González E..(2015) "Revisión de los últimos eventos magmáticos del Cenozoico del sector norte-central de la Sierra Madre del Sur y su posible conexión con el subsuelo profundo de la Cuenca de México." [citado 2019-03-14]. [En línea] Disponible en: <https://www.researchgate.net>.

El conjunto de montañas formó un vaso de almacenamiento en donde se encontraron depósitos y rellenos desde el Periodo Cuaternario. Las primeras sierras formadas, fueron las del norte de la cuenca, posteriormente las del sur, como se muestran algunas en la *Tabla 1*.

Sierra	Periodo
Sierra de Tezontlalpan	Mioceno Inferior
Sierra de Tepozan	Mioceno Superior.
Sierra de Chichinautzin	Cuaternario Superior

*Tabla 1 Periodo de las Sierras de la Cuenca de México.*⁸

Este último evento es el más determinante y que cobra mayor importancia al sur de la cuenca. Antes de desarrollarse esta última sierra, había dos valles que solían drenarse hacía el sur en el Río Amacuzac. El de mayores dimensiones pasaba por la Sierra de las Cruces y llegaba hasta el Lago de Xochimilco, y el menor tenía una trayectoria que pasaba por la Sierra Nevada hasta Cuautla.

Todos estos acarreos aluviales se depositaron hasta alcanzar un espesor de 10 m. Posteriormente se cerró la cuenca y comenzaron a formarse los depósitos lacustres.

Todos estos depósitos aluviales fueron producto de los volcanes de la zona y del material producido durante diferentes periodos. El primer horizonte lo constituye la Formación de Tarango, la cual contiene en su parte más superficial carbonato de calcio, esto se encuentra en arena y limo. Esta capa esta cementada y representa la primera capa dura. También en la estratigrafía se encuentra ceniza volcánica muy fina estratificada con un contenido de agua alto.

Sobre esta formación, los depósitos que se asentaron fueron los correspondientes a la Formación de Tacubaya, la cual está compuesta por arcilla de alta compresibilidad y contiene lentes de arena. Finalmente, sobre estos estratos se encuentran las Formaciones Becerra, Barrilaco y Totolsingo.⁸

Estas formaciones dieron paso a que se constituyera la siguiente estratigrafía en la zona lacustre de la Ciudad de México.

- a) **Manto Superficial.** Perteneciente a las formaciones de Barrilalco y Tololsingo. Este estrato está compuesto por depósitos que son arenos arcillosos o limosos y suelen tener restos arqueológicos o rellenos de construcciones previas que suelen encontrarse hasta los 10 metros de profundidad.

- b) **Formación Arcilla Superior.** Suelos que corresponden a la Formación de Tacubaya, formados por el arrastre y sedimentación de ceniza volcánica de tamaño ultrafino en el ambiente del Lago de la Ciudad de México y el Lago de Texcoco; está constituida por arcilla de alta compresibilidad, de consistencia blanda, su espesor oscila entre 15 y 32 m, y contiene lentes delgadas de arena.

- c) **Capa Dura.** La definición de esta capa se hace con datos de la zona céntrica de la ciudad, se le atribuye un espesor de aproximadamente 3 m y una composición de suelos limoarcillosos compactos o rígidos, cementados con carbonato de calcio. Esta descripción se apega a una época geológica donde predominó la sequía y en condiciones a una elevación más o menos constante en la cuenca, excepto en la zona céntrica del Lago de Texcoco que permanecía sumergida.

- d) **Formación Arcillosa Inferior.** Este estrato tiene un espesor de 4 a 15 metros. Compuesta por arcilla volcánica.

- e) **Depósitos Profundas.** Depósitos de arena con grava separados por estratos de limo o arcilla arenosa.

Estas capas se muestran gráficamente en la *Ilustración 4* que se muestra a continuación en donde se expone una secuencia estratigráfica de la Ciudad de México.⁸

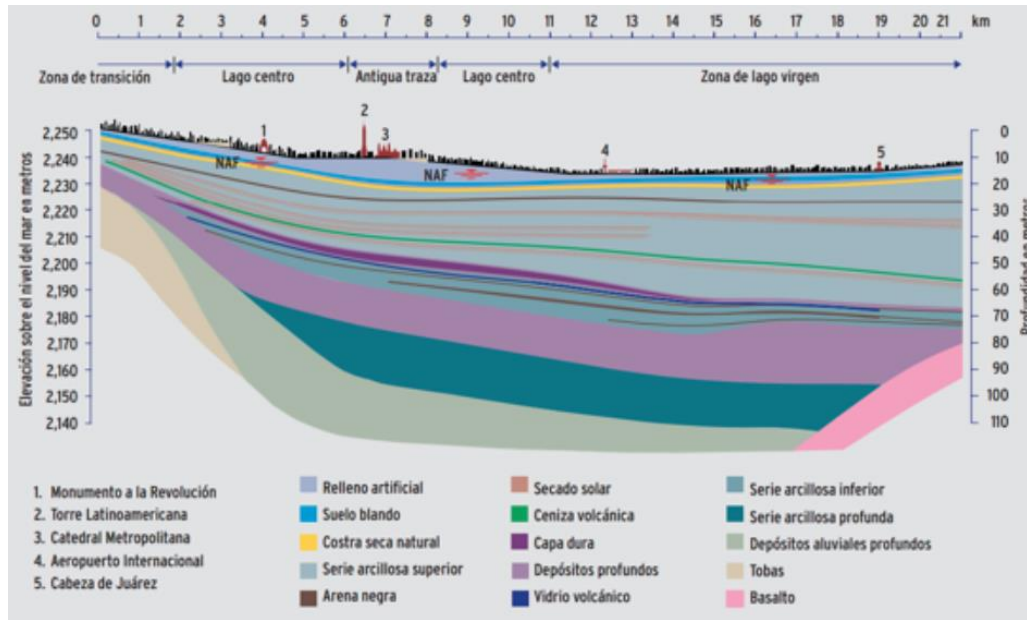


Ilustración 4 Sección de la secuencia estratigráfica de la Ciudad de México.¹⁰

Las tres últimas capas corresponden a la formación de Tarango. Las definiciones anteriores se aplican con exactitud a la zona lacustre de la Ciudad de México y de Texcoco. Sin embargo, hacia el sur de la Ciudad de México se encuentra una zona de transición entre estos lagos y los Lagos de Chalco y Xochimilco cuya estratigrafía se ve afectada por la actividad de pequeños conos volcánicos. Algunos de los volcanes de las Sierras de Santa Catarina y de Chichinautzin tuvieron actividad hasta épocas muy recientes.

En algunos puntos al sur de Xochimilco, se presenta una costra superficial de 3 m de espesor y a continuación arcilla de alta compresibilidad con contenido de agua de 200%. En los pozos para abastecimiento de agua potable de la Zona San Lorenzo Tezonco se tienen alternancias de basalto, arcilla y arena hasta 180 m de profundidad. La aparición de basalto sobre arcilla lacustre permite afirmar que ha habido derrames basálticos hasta

¹⁰ Fotonavegante (2015) Sismicidad en el Valle de México. Citado 2019-03-14]. [En línea] Disponible en: <http://fotonavegante.blogspot.com>.

épocas en las que el Lago de Texcoco había alcanzado su máxima elevación.¹¹

En el área entre los Lagos Texcoco y Xochimilco se encuentra con frecuencia arena, de características diferentes a las observadas en el centro de la Ciudad de México, estratificada con arcilla, mientras que en el Lago de Texcoco y en el centro de la Ciudad de México las capas de arena son muy escasas y sólo aparece la primera capa dura como una unidad continua en ambos lagos.

La explicación de esta diferencia estriba en lo siguiente: las Sierras de Chichinautzin y la de Santa Catarina tenían pequeños conos volcánicos activos, estos arrojaron ceniza volcánica y arena en sus explosiones.

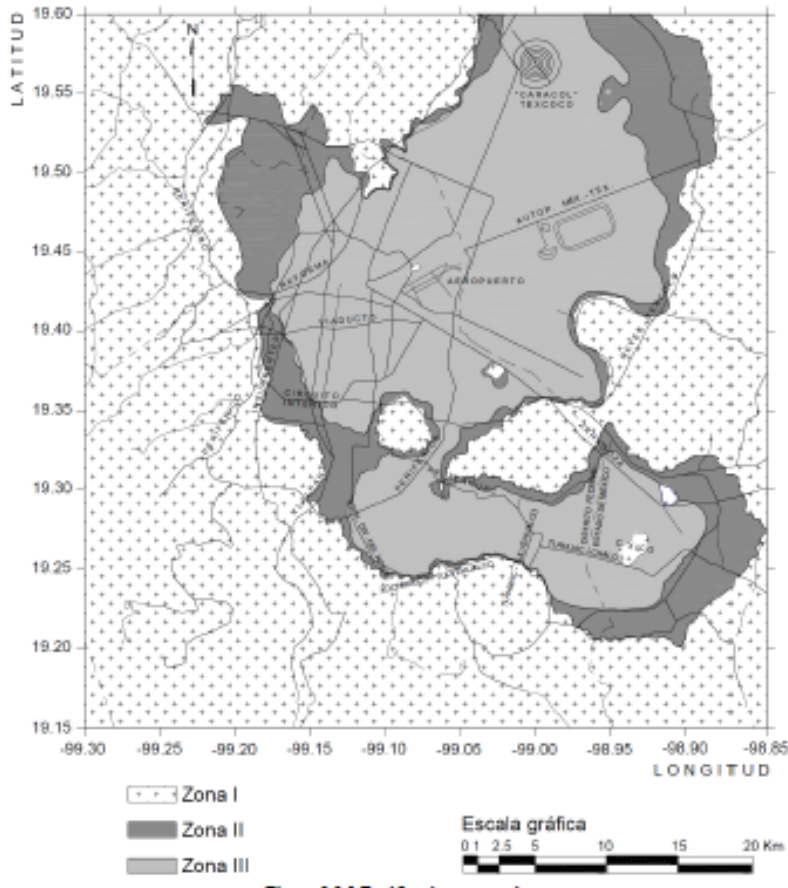
La arena se encuentra en mayor proporción en las regiones cercanas a estos pequeños volcanes, de acuerdo con los datos de distintos sondeos la ceniza puede transportarse a regiones más lejanas.

Entonces únicamente alrededor de las serranías mencionadas debería aparecer la arena, lo cual es un hecho tanto en Iztapalapa como en Xochimilco. Además, se puede apreciar que al aproximarse a la Sierra de Chichinautzin desaparece la arcilla y se registra mayor espesor de arena hasta llegar a las formaciones de basalto donde desaparece totalmente la arcilla. Adicionalmente se debe considerar que las aportaciones de los lagos de Texcoco y del centro Ciudad de México, provienen de ríos que escurren sobre zonas impermeables arrastrando sólidos; mientras que las mayores aportaciones de los lagos de Xochimilco y Chalco, provienen de manantiales que afloran al pie de los derrames basálticos.⁸

11 Gaceta Oficial del G.D.F. Reglamento de Construcción del D.F. Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones, G.D.F. [citado 2019-04-10]. [En línea]. Disponible en: cgservicios.df.gob.mx/prontuario/

1.2 Zonificación estratigráfica

Con base en la descripción geológica, los sondeos realizados en diversos lugares de la cuenca y la zonificación de la Ciudad de México, se puede apreciar en la *Ilustración 5*, la distribución de las zonas estratigráficas de la Cuenca de la Ciudad de México.¹¹



*Ilustración 5 Zonificación de la Cuenca de México.*¹¹

Dichas zonas están descritas por las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones de la siguiente manera:

a) Zona I. Lomas

Formadas por rocas o suelos generalmente firmes que fueron depositados fuera del ambiente lacustre, pero en los que pueden existir, superficialmente o intercalados, depósitos arenosos en estado suelto o cohesivos relativamente blandos.

b) **Zona II. Transición**

Es donde ocurren los cambios más notables en la estratigrafía. Los depósitos profundos se encuentran a 20 m de profundidad, o menos, y que está constituida predominantemente por estratos arenosos y limo-arenosos intercalados con capas de arcilla lacustre, el espesor de estas es variable.¹¹

Existen 3 subzonas:

- Alta.
- Baja.
- Abrupta.

c) **Zona III. Lago**

Integrada por potentes depósitos de arcilla altamente compresibles, separados por capas arenosas con contenido diverso de limo o arcilla. Estas capas arenosas son generalmente medianamente compactas a muy compactas y de espesor variable de centímetros a varios metros. Los depósitos lacustres suelen estar cubiertos superficialmente por suelos aluviales.

Existen 3 subzonas:

- Virgen.
- Centro I.
- Centro II.¹⁰

1.3 Cimentaciones

Uno de los propósitos de las cimentaciones es la trasmisión de cargas de una estructura a los estratos resistentes del subsuelo, que garantice su estabilidad y que se eviten asentamientos durante la vida útil. Para elegir un tipo de cimentación se enlistan a continuación los siguientes aspectos:

- Cargas
- Subsuelo
- Costo de cimentación.

Cargas. Para un diseño de la cimentación adecuado, es necesario la evaluación a precisión de las acciones permanentes y accidentales a las que estará sometida. Posteriormente se debe conocer su distribución y saber que magnitud de esfuerzos se aplicarán en el subsuelo y garantice estabilidad

Subsuelo: Se debe realizar un estudio de los estratos en los que se apoyará la estructura y tener en cuenta su resistencia y comportamiento ante cargas externas que definan el tipo de cimentación que sea adecuado y garantice la estabilidad de todo el sistema. Dicho estudio va a permitir determinar la configuración y composición de los diferentes estratos, además de las propiedades índice y mecánicas. Esta información es útil para seleccionar un estrato donde pueda apoyarse la cimentación y transmita cargas más eficientemente al subsuelo.

Costo de cimentación: Cuando se elige un tipo de cimentación se debe definir el procedimiento constructivo que se va a utilizar, en primer lugar, para saber cómo podría influir este aspecto en el diseño y las cargas que pueden tener un impacto al aplicarlas. También se deben considerar los recursos con los que se cuentan, y las especificaciones de los puntos anteriores.^{12 13}

En términos generales, toda cimentación debe diseñarse para satisfacer dos requisitos esenciales:

12 Ralph Peck (1987) Ingeniería de Cimentaciones. Limusa. México

13 Auvinet G. (1983) Manual de diseño y construcción de pilas y pilotes. SMMS. México.

- Tener un factor de seguridad contra falla última
- Los asentamientos no han de sobrepasar los límites permisibles para la superestructura.

Para un caso específico, uno de estos dos requisitos condiciona las dimensiones de la cimentación; por tanto, es necesario calcular tanto la capacidad de carga como el asentamiento probable de la cimentación. Obviamente, la influencia del tipo de suelo es evidente; así en arena densa o mediana, en la que los asentamientos son generalmente pequeños, este criterio rara vez será el decisivo. Por el contrario, en cimentaciones sobre arcilla blanda, los asentamientos normalmente son el factor determinante. De lo anterior, se concluye que el diseño geotécnico de una cimentación profunda debe comprender las siguientes etapas de trabajo:

1. Investigación geotécnica.
2. Selección del tipo de elemento de cimentación (pilote, pila o muro) y del equipo de construcción.
3. Determinación preliminar de la longitud y capacidad de carga.
4. Verificación de las etapas 2 y 3 empleando los datos obtenidos de pruebas de carga.¹²

La capacidad de carga, mencionada en la etapa 3, se define con dos criterios fundamentales:

- La capacidad de carga última, esta es la carga promedio por unidad de área que puede producir la falla de cimentación por esfuerzo cortante o por esfuerzo excesivo.
- La capacidad de carga permisible, es la carga promedio por unidad de área que no provocará asentamientos que superen al admisible.

Para el diseño estructural de una cimentación deben tenerse en cuenta los siguientes factores:

- Capacidad de carga del material de apoyo (suelo o roca).
- Deformaciones del suelo, inmediatas y diferidas.

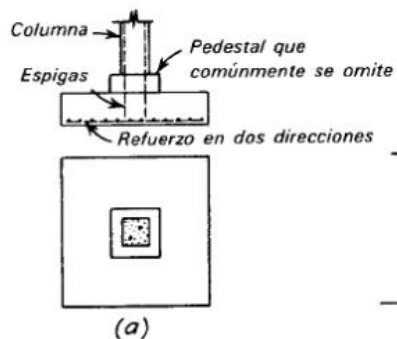
- Resistencia y rigidez de la subestructura.^{12 13}

1.3.1 Clasificación de cimentaciones

Las cimentaciones pueden ser clasificadas de acuerdo a diferentes criterios, los cuales serán útiles si permiten identificar con precisión los elementos que transmitirán las cargas al suelo, así como el mecanismo de falla para la aplicación del método de cálculo adecuado.¹²

1.3.1.1 Cimentaciones superficiales

Como su nombre lo indica, son aquellas que se construyen sobre estratos superficiales, donde por lo general no se requiere de maquinaria pesada ni procedimientos constructivos especiales y su diseño no acepta esfuerzos de tensión. Las cimentaciones superficiales más comunes son las zapatas aisladas, las zapatas corridas y las losas, como la que se muestra en la *Ilustración 6*, exponiendo además sus partes que la componen:



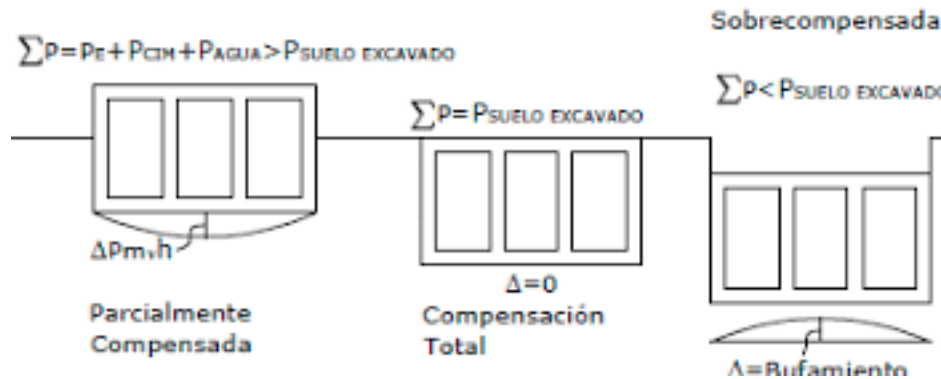
*Ilustración 6 Cimentaciones superficiales. Partes de una zapata.*¹²

1.3.1.2 Cimentaciones compensadas.

Este tipo de cimentaciones son aquellas en las que se busca reducir el incremento neto de carga aplicando al subsuelo mediante una excavación en donde se aloja un cajón de cimentación.

Si la transmisión de carga neta al subsuelo en el desplante del cajón resulta positiva, nula o negativa, la cimentación se denomina parcialmente compensada o sobre compensada, respectivamente.^{12 13}

Con propósito de evitar que la estructura experimente asentamientos excesivos, es común que las cimentaciones parcialmente compensadas se combinen con pilotes de fricción, en la *Ilustración 7* se exponen los diferentes grados de compensación en las cimentaciones.



*Ilustración 7 Cimentaciones Compensadas.*¹²

1.3.1.3 Cimentaciones Profundas.

En general se recomienda el uso de una cimentación profunda para apoyar una estructura cuando los esfuerzos inducidos en el suelo por las solicitaciones a las que quede sometida, exceden la capacidad de soporte de los estratos más superficiales, o cuando las restricciones de funcionamiento u operación obliguen a dicha solución. Los elementos constructivos que se conocen como cimentaciones profundas son: pilas, pilotes y muros colados en sitio.

El análisis de una cimentación profunda se inicia con la selección de aquellos elementos constructivos que sean compatibles con la estratigrafía y propiedades mecánicas de los suelos o rocas del sitio, a partir de la cual se define la profundidad de cimentación, se dimensionan los elementos elegidos (pilotes, pilas o muros), se recomiendan los procedimientos constructivos más adecuados y se hace una predicción del comportamiento de la cimentación.¹⁴

¹⁴ Juárez E. (1992) Fundamentos de Mecánica de Suelos. Tomo 2. LIMUSA Grupo Noriega de Editores México 1992.

1.3.1.3.1 Pilotes

Cuando el suelo situado al nivel en que se desplantaría normalmente una zapata o una losa de cimentación, es demasiado débil o compresible para proporcionar un soporte adecuado, las cargas se transmiten a un material más adecuado a mayor profundidad por medio de pilotes o pilas, como se muestra su instalación en la *Ilustración 8*.



*Ilustración 8 Instalación de pilotes.*¹⁵

Los pilotes son miembros estructurales esbeltos que transmiten al subsuelo las cargas provenientes de una estructura y de la misma cimentación con el propósito de lograr la estabilidad del conjunto. Existe una gran variedad de herramientas para hincarlos. A menudo se hincan en grupos o en filas, conteniendo cada uno suficientes pilotes para soportar la carga de una sola columna o muro. Las pilas por otra parte tienen usualmente una sección transversal mayor siendo cada una de ellas capaz de transmitir toda la carga de una sola columna al estrato de apoyo.¹³

¹⁵ Soletanche Bachy (2012) Guía Técnica. Francia.

Los pilotes más utilizados son los precolados de concreto reforzado con varilla corrugada de acero; su sección puede ser cuadrada u ortogonal, recomendándose que su área no excede 0.25 m^2 . La longitud de los tramos de pilotes precolados debe ser definida considerando el esfuerzo resistente de los mismos, y las maniobras de levante e izaje a las que estarán sometidos, a fin de preservar la integridad del pilote.

En la mayoría de los casos, el diseño estructural de un pilote es determinado por los esfuerzos a los que estará sometido durante las maniobras de estiba, izado e hincado, ya que por lo general estos son mayores a los esfuerzos que desarrolla en la trasmisión de cargas al subsuelo. Cuando la capacidad estructural de un pilote es superior a la capacidad de carga del estrato resistente, puede transmitirse mayor carga a través del pilote incrementando la sección de su punta con respecto a la del fuste mediante un bulbo.¹²

1.3.1.3.2 Pilas

Las pilas como se menciona anteriormente son elementos de cimentación profunda con secciones mayores que la de los pilotes, las cuales también transmiten al subsuelo las cargas provenientes de una estructura y de la misma cimentación con el propósito de lograr la estabilidad del conjunto.

Las pilas se fabrican directamente en el subsuelo por lo que se les conoce como elementos fabricados en sitio. Cuando los esfuerzos que se transmitirán al subsuelo son exclusivamente de compresión, las pilas pueden fabricarse de cualquier material que tenga la resistencia requerida, los cuales deben ser estables durante su vida útil de la estructura que soportarán.

Las pilas cuentan con una gran variedad de métodos para ser excavados, como por ejemplo las pilas perforadas entubadas, las excavadas bajo lodos de perforación, las pilas excavadas con CFA o barrena con hélice continua, con perforación discontinua, hélice montada con Kelly telescópico para perforación, cuchara de cable suspendida circular o rectangular, para pilas de gran diámetro la perforadora de circulación inversa, hidrofresa y almeja

hidráulica en el caso de barretes y martillo de fondo de pozo con o sin entubado.¹⁵

También hay varias formas para vaciar el concreto, la más común es con un Tubo Tremie, comúnmente se instala después de colocar el acero de refuerzo en la perforación, también hay casos donde se vacía antes de instalarlo o bien se integra a la herramienta de perforación como es el caso de la barrena CFA.

Las pilas CFA se construyen de la siguiente manera:

1. Con la barrena se comienza a perforar manteniendo la verticalidad máxima de 84°.
2. Se perfora hasta llegar a la profundidad de desplante de la pila determinado en el diseño.
3. Al llegar a ese nivel a través de un tubo Tremie interno en la barrena se comienza a vaciar el concreto fresco. De esta manera el operador debe ser muy cuidadoso en retirar la herramienta en cuanto el concreto ocupe todo el espacio excavado. De lo contrario, se genera un fenómeno de succión provocando que las paredes de la perforación se deformen teniendo que perforar otra vez esa sección.
4. Al retirar la barrena y completar el vaciado del concreto en la perforación se retira de la herramienta el material excavado realizando rotaciones de forma inversa asegurándose que caigan en un sitio preestablecido.
5. Se instala la jaula de acero reforzado sobre la perforación con concreto fresco.¹⁵

El método explicado anteriormente se muestra en la Ilustración 9:

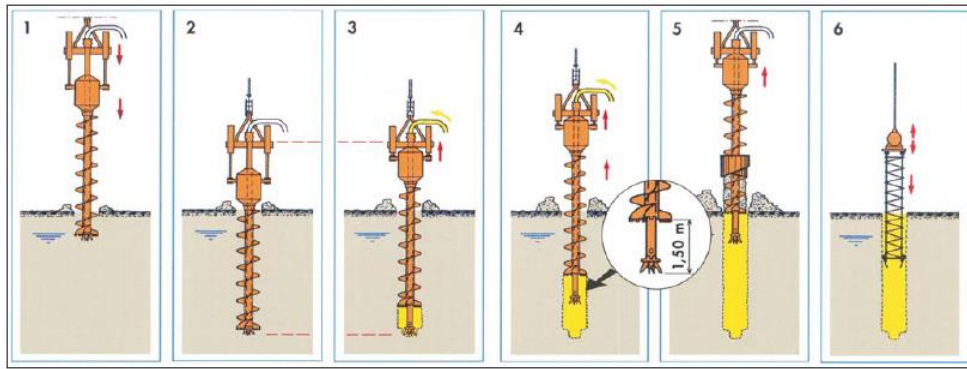


Ilustración 9 Construcción de pilas con barrena CFA.¹⁵

Otro de los procedimientos para construirlas son utilizando únicamente el Sistema Tremie como se muestra en la *Ilustración 10*.



Ilustración 10 Colocación de concreto fresco en una pila.¹⁶

Cuando los esfuerzos se transmitan al subsuelo son de compresión y tensión, las pilas por lo general se fabrican utilizando concreto premezclado reforzado con varillas de acero corrugadas y perfiles de acero como el H siendo el más común.

Las principales ventajas de usar pilas en cimentaciones profundas, comparando una donde se usan pilotes son:

- Las pilas no están expuestas a daños estructurales ya que no son hincadas como en el caso de los pilotes al ser instalados.
- Se genera menor ruido al construir pilas que al hincar pilotes prefabricados.
- No requiere juntas en caso de que el elemento alcance grandes profundidades.
- Es mayor la capacidad de carga de una pila que la de un pilote

¹⁶ CYPE Ingenieros, S:A: (2019).Generador de precios. [citado 2019-04-10]. [En línea]. Disponible en <http://www.colombia.generadordeprecios.info>.

Sin embargo, existen desventajas al usar estos elementos:

- En primer lugar, las pilas requieren perforación previa, esto aumenta el tiempo de ejecución.
- En ocasiones cuando no hay suficiente consistencia en un estrato, puede alterarse la forma de la pila.
- Se puede cercenar el fuste de la pila cuando aumenta la presión del agua subterránea cuando se están colando.¹³

Su utilización puede tener propósitos adicionales a los descritos anteriormente, en casos como en tensión. Cuando las características de algunos estratos del subsuelo en donde se instalará una estructura indican un empotramiento expansivo, es necesario reducir esta deformación o evitar la estructura sea afectada por ella, por la cual el elemento se desplanta en un estrato resistente, en donde la fricción generada en el fuste cambia de sentido en la frontera de los estratos de suelo resistente y expansivo.

Al conocer el entorno de un proyecto, permite tomar decisiones adecuadas, siendo recomendable verificar si las construcciones vecinas, existentes o futuras modificarán el comportamiento de la estructura en estudio. En el caso de la presencia de excavaciones adyacentes a elementos que pueden ser soportados por los estratos superficiales, es necesario que estas estructuras se apoyen en cimentaciones profundas, con el propósito de las cargas se transmitan a estratos localizados por debajo del fondo de la excavación vecina para evitar que cause inestabilidad.¹⁴

Es necesario considerar en el diseño en las pilas y pilotes, que puedan resistir:

- El aplastamiento bajo cargas verticales.
- Tensión debida a fuerzas de subpresión y bufo del suelo.
- Fuerzas horizontales que ocasionen flexión.
- Fuerzas excéntricas que causen flexión.
- Momentos flexionantes por curvatura.
- Efecto de columna en los tramos sin soporte lateral del terreno en contacto con aire, agua o lodo muy fluido.¹³

Barrettes

Se refiere a una pila de concreto armado construida en una zanja corta y profunda excavada con lodo bentonítico o polímeros. Este proceso es muy similar al usado en el Muro Milán. Su proceso constructivo es muy similar al muro diafragma. Se utiliza como pila de cimentación, transmite carga de la superestructura y llega al fondo, también se les conoce pila corrida y pueden tener secciones transversales compuesta de tipo T, L, Y e I. (Ilustración 11).

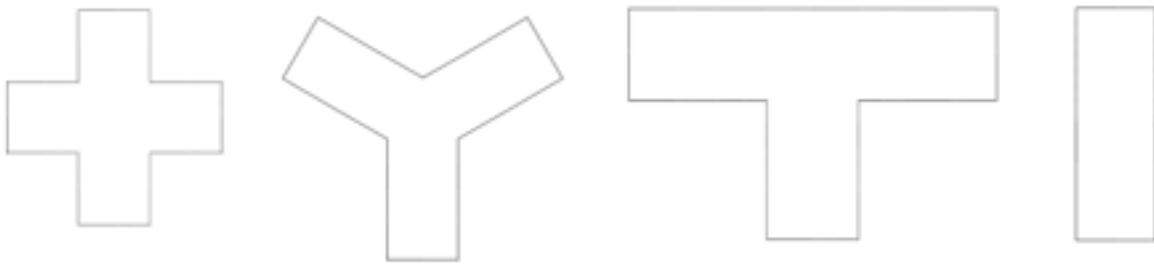


Ilustración 11 Secciones transversales de barrettes.

Se han utilizado en edificios de gran altura con éxito en diversas obras como, por ejemplo: obras subterráneas, líneas de transmisión eléctrica, autopistas elevadas y puentes.¹³

En la Ciudad de México se han aplicado en pasos a desnivel, obras viales y en algunos rascacielos. Sin embargo, parece ser que el uso de barrettes en México va en aumento, por sus grandes ventajas. Una de estas, es que tienen un área y sección transversal con dimensiones mayores, resiste mejor las cargas verticales debido al aumento de fricción a lo largo de la pila. También pueden resistir cargas laterales y momentos de volteo muy altos. Para tener un mayor momento de inercia en un determinado eje se puede orientar a donde más convenga, esto mejora las sollicitaciones sísmicas.

En la Ciudad de México, se han utilizado en obras importantes como en Torre Reforma y el estacionamiento de la Plaza de la República. En este

último se colaron barretes y posteriormente mediante un sistema de excavación Top Down se construyeron las losas de cada nivel.¹⁷

¹⁷ Schneebeli.G. (1981). Muros Pantalla. España: TECNICOS ASOCIADOS SA.

1.4 Muro Milán.

El Muro Milán, diafragma o pantalla se puede definir como una pared de concreto reforzado conformada en el subsuelo y que indistintamente recibe alguno de esos dos nombres, ha influido notablemente en la construcción de estructuras alojadas en el subsuelo y sistemas subterráneos de transporte urbano en muchas ciudades del mundo; se utilizan y diseñan para soportar los empujes horizontales de la masa de suelo puedan hacerlo como parte estructural en las condiciones que el suelo impone a corto y largo plazo, así como en la condición sísmica. Otra función complementaria del muro es la de servir de lastre para soportar la subpresión a la que a veces está sometida la estructura.

1.4.1 Ventajas del procedimiento

- Con Muros Milán es posible formar muros de contención, atravesando estratos en los que no es posible hincar tablestacas.
- Las vibraciones al hincar tablestacas, tienden a causar ruido. Estas son acciones que se deben evitar en zonas urbanas. Una de las ventajas más importantes es que el proceso de construcción de los muros pantalla no provocan ruido.
- También se pueden alcanzar grandes profundidades.

1.4.2 Diseño de Muro Milán.

Antes de diseñar un muro Milán es debe recabar información como:

- Geometría del sitio.
- Presencia de estructuras cercanas a la excavación.
- Condición de estructuras subterráneas.
- Uso previo del sitio.
- Información geotécnica.
- Presencia de suelos contaminados.
- Restricciones ambientales
- Definir la función del muro.

- Nivel piezométrico de aguas freáticas.¹⁸
- Presencia de grandes rocas que impidan excavar la zanja.
- Condiciones artesianas.
- Posibles problemas de estabilidad.
- Sobrecargas temporales.

En el diseño de un muro diafragma o Muro Milán, es fundamental conocer la respuesta del suelo ante los cambios provocados por la excavación, ya que esta origina un alivio de los esfuerzos totales, por la remoción de suelo y agua, cuyo resultado es el movimiento de la masa de suelo. El diseño se debe concentrar en el control y mitigación de las deformaciones inducidas. El control de estos movimientos es importante ya que su magnitud puede dañar a estructuras adyacentes o a los servicios públicos.

La respuesta del suelo está influenciada principalmente por los siguientes factores:

- Control y abatimiento del nivel freático.
- Proceso y secuencia constructiva.
- Tipo de soporte y apuntalamiento.

Por simple lógica se puede advertir, que cuanto más grande es la excavación mayor es el alivio de los esfuerzos totales y por lo tanto mayores los movimientos del suelo. En el caso extremo, una excavación profunda débilmente soportada puede originar una falla general por esfuerzo cortante de los suelos.

En principio el Muro Milán es impermeable, por lo que no existe flujo de agua a través de su sección transversal; en la práctica, debido en muchos casos al deficiente procedimiento constructivo, la alta permeabilidad de la pantalla produce un abatimiento del nivel de agua exterior originando asentamientos; el análisis del flujo de agua bajo una condición bidimensional puede estimar el gasto y el asentamiento producido alrededor de la excavación.¹⁹

¹⁸ Schmitter J. (2002) "Manual de Contrucción Geotécnica Tomo I". SMMS. México

Una de las características de este tipo de muro de contención es anclar o apuntalar; en cualquiera de los dos casos el método de diseño es similar. Para los apuntalamientos se utiliza normalmente tubería de acero acunada adecuadamente contra el muro; si el ancho del claro de excavación que se quiere librar es muy grande, se utilizan vigas en celosía; en algunos si la excavación lo permite los puntales se acunian contra la estructura.

También es necesario tomar en cuenta tolerancias en diseño, el equipo de excavación que se planea ocupar y el ancho de dicha herramienta, método constructivo, forma de estabilización de la zanja. En cuanto a las jaulas del acero reforzado debe considerarse la discontinuidad entre estos elementos

El proceso constructivo de un muro Milán incluye llevar a cabo los siguientes conceptos tal y como se muestran en la *Ilustración 11*, los cuales se detallarán en el Capítulo: Proceso Constructivo del proyecto University Tower: ¹⁸

Ejecución de la obra

Para su construcción se recurren a las etapas que se muestran en la *Ilustración 12*.

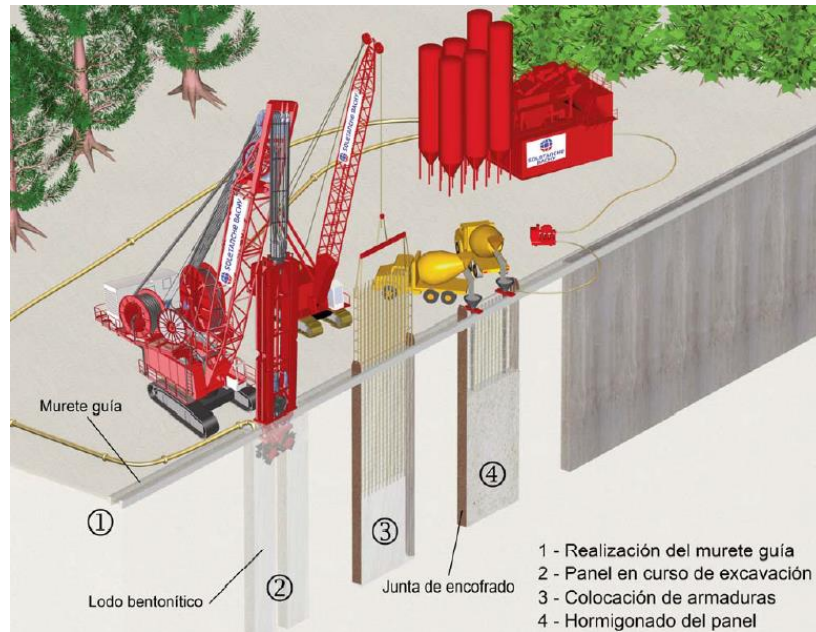


Ilustración 12 Procedimiento de construcción del Muro Milán.¹⁹

1.- Primero se construye un brocal profundo, colando muros guía. Con este brocal se logra guiar la almeja de la perforadora para empezar con las excavaciones profundas. A medida que se va avanzando se vierten los lodos de bentoníticos, que son sumamente importantes para estabilizar en la excavación.

2.-La excavación se hace por entrepaños de longitud limitada. Es importante tener considerado un orden de paneles por fines logísticos. Por ejemplo, en el proyecto University Tower por el limitado espacio, se deben excavar paneles opuestos para aprovechar el mayor espacio posible.

3.- Un aspecto importante es mantener limpia la zona y se coloca el armado del panel, se baja mediante una grúa y se colocan los “juntas CWS”.

4.- A través de un “tubo Tremie” que se coloca hasta el fondo se efectúa el vaciado de concreto. Durante todo este proceso debe de permanecer siempre introducido. De esta manera se va rellenando con la mezcla de concreto desplazando el lodo, que se evacúa a un depósito de almacenamiento y tratamiento transferido directamente hacia otro entrepaño en fase de excavación. Antes de que se endurezca el concreto, se remueven las juntas CWS.

¹⁹ Soletanche Bachy (2012) “Guía Técnica”. Soletanche Freyssinet. Francia

5.- El proceso de ejecución puede ser por paneles primarios, secundarios, y mixtos.

Las tolerancias permitidas en la excavación del muro Milán son las siguientes de acuerdo al NF EN 1538 Muro Milán que se muestran en la Tabla 2.

Concepto.	Tolerancia.
Desviación horizontal	<25 mm
Desviación horizontal precolado	<50 mm
Verticalidad.	1%
Irregularidades del terreno por caídos en la pared de la excavación.	<100 mm

TABLA 2 Tolerancias máximas en la excavación de paneles.²⁰

En el caso de las Normas Técnicas Complementarias sobre el Diseño y Construcción de Cimentaciones, la verticalidad máxima es 2% en excavaciones menores a 30 m y para mayores es de 3%. Sin embargo, en algunos casos se debe ajustar a casos más estrictos para que el muro actúe de acuerdo al diseño.¹⁹

1.4.3 Experiencias del Muro Milán en México.

La necesidad de construir el Metro hizo necesario adaptar la tecnología del Muro Milán a las arcillas blandas del subsuelo. Se puede considerar al Ing. Enrique Tamez, director de la empresa Solum, como especialista que logró resolver aspectos técnicos de la construcción del Metro e hizo posible su construcción. Se iniciaron pruebas en 1966, al siguiente año se construyeron los muros de la Línea 2 del Metro.

Al Muro Milán en la construcción del Metro de la ciudad de México, expuesto en la *Ilustración 13*, generalmente se le consideró durante la excavación como el elemento temporal que soporta los empujes horizontales y que posteriormente contribuye solo como parte del peso del cajón, ya que la impermeabilidad y acabado final se le confió al muro de acompañamiento.

²⁰ European Standard. (2010). NF EN Muro Diafragma. AFNOR. Francia



*Ilustración 13 Construcción del metro en las Ciudad de México.*²¹

Cabe resaltar que solo algunos tramos del Metro de la ciudad de México fueron construidos utilizando al Muro Milán como muro estructural. El criterio del muro de acompañamiento condujo al permitido descuido en la calidad final del muro Milán, perdiéndose la posibilidad de adoptarlo como muro estructural definitivo y estanco, cualidades que le hubieran permitido incrementar su utilidad.²²

En 1988 COVITUR (Comisión de Vialidad y Desarrollo Urbano) construyó un tramo experimental del cajón del Metro con paneles de concretos prefabricados instalados en una zanja llena con lodo fraguante que endurece a una resistencia preestablecida, con la idea de eliminar los problemas y errores del colado del concreto en el lugar, desafortunadamente los resultados fueron poco satisfactorios, aunque la prueba se inspiró en la técnica de la empresa Bachy de Francia.

En zonas costeras de 1979 a 1980, se introdujeron los muros Milán en puertos del Golfo de México, estos fueron; Dos Bocas y Altamira. Como fueron los primeros proyectos donde se usaba esta tecnología, fueron mediocres en cuestión a descuido de detalles. Posteriormente entre 1982 y 1983 se construyeron Muros Milán en la siderúrgica SICARTSA en el Puerto de Lázaro Cardenas, estos suelos tienen características aluviales de alta permeabilidad, a pesar de estas condiciones la calidad fue excelente.¹⁸

En 1992 se construyó la cimentación de un edificio con una excavación profunda de cinco sótanos recurriendo a los Muros Panasol, el Prof. J. Grenet de Soletanche intervino en los detalles del caso y posteriormente, en

²¹ La Silla Rota. 50 años del Metro en Fotografías. [Citado el 05 de mayo del 2019]. Disponible en: <https://lasillarota.com/galeria>.

²² Blanco A. (1989) "Construcción especializada en geotécnica". SMMS.México.

1993 se construyó un tramo de Metro con esa técnica; esos trabajos han estimulado a varios diseñadores y constructores para desarrollar sus versiones de la construcción del muro prefabricado.

Con el tiempo se llegó a las siguientes conclusiones en México:

- Se ha confirmado que el Muro Milán puede ser un elemento estructural definitivo y confiable.
- Se ha aplicado la tecnología del muro con piezas prefabricadas, que se ensamblan en la zanja y confinan con un lodo fraguante que endurece a la resistencia del suelo del sitio.
- Se ha desarrollado la construcción de muros esbeltos de 35 cm de espesor y abre muchas opciones de aplicación de los Muros Milán en la construcción de cajones de cimentación.

Para garantizar la estabilización de las paredes de las perforaciones se desarrolló un mecanismo a base de lodos bentoníticos:¹⁴

1.4.4 El papel de los lodos bentoníticos

La bentonita es una arcilla que se usa para hacer una suspensión acuosa especial que funciona como lodo de perforación.

Las principales funciones que ejerce el lodo durante la perforación en cualquiera de sus variantes, son las siguientes:

a) **Enfriamiento y lubricación de la almeja.**

Cuando se está desarrollando una perforación, la temperatura de la almeja tiende a subir por la fricción de la herramienta. Es por eso que el lodo debe cumplir con la función de enfriarla. Otra función es lubricar la herramienta para tener un mejor funcionamiento.

b) **Estabilidad en las paredes de la zanja.**

Como se ha mencionado anteriormente, los lodos bentoníticos tienen la característica de darle estabilidad a las paredes de una zanja de gran profundidad. Esto lo hace a través de la propiedad de formar una película en las paredes de la excavación, lo cual ayuda a minimizar los derrumbes. Además, el lodo no se filtra al terreno.

c) **Control de las presiones.**

Una de las funciones más importantes es tener un control de la presión dentro de la excavación. La presión hidrostática está en función de la densidad del lodo y de la profundidad de la zanja. La densidad debe ser adecuada para soportar el flujo de fluidos hacia la excavación.

d) **Suspensión de cortes y sólidos al interrumpirse la perforación.**

Debido a las características del lodo, los recortes pueden quedar suspendidos en el fluido, evitando que los cortes caigan al fondo y causen problemas.²³

23 Benítez M. (2017). Apuntes de Fluidos de Perforación. México: UNAM.

e) Transmisión de la potencia hidráulica a la almeja.

El fluido de perforación puede funcionar como un medio para transmitir la potencia hidráulica requerida a través de las salidas del lodo a la almeja, donde gran parte de esta potencia producida por las bombas se utiliza para mover la columna del lodo existente en el espacio anular y así establecer una circulación pertinente; ayudando a perforar la formación y limpiar el fondo de la zanja.²¹

1.4.4.1 Propiedades de lodos bentoníticos.

Estos lodos se caracterizan por formar las siguientes propiedades, las cuales se deben regular con un control de calidad adecuado dos veces al día para asegurar su funcionamiento correcto:

Cake:

Los lodos bentonítico introducidos durante la excavación de la zanja 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.

Se deben considerar dos casos distintos:

1. El terreno está formado por arcilla es entonces cuando los lodos bentoníticos no pueden penetrar. Se seca al entrar en contacto con el terreno y se deposita sobre la superficie una película de arcilla. La película que se menciona representa, en relación al lodo, la zona impermeable sobre la cual la presión actúa hidrostáticamente.²⁴
2. Cuando la granulometría del terreno es discontinua, por ejemplo, en el caso de grava o arena, el lodo puede penetrar en el terreno una cierta profundidad. Pero no penetrará indefinidamente a causa

²⁴ Villegas R. (2009) La Química de los lodos de perforación ejemplos y aplicaciones en Ciencias de la Tierra. UNAM.

principalmente de sus propiedades tixotrópicas que hacen que cuaje al cabo de un cierto tiempo.

Masa volumétrica

Los lodos de perforación pueden tener un rango de densidades de 1.10 a 1.15 g/cm³ lo que permite una óptima velocidad de penetración al contrarrestar la presión del terreno, sin provocar pérdidas de circulación. Para prevenir la entrada de fluidos desde el terreno a la zanja, el lodo debe proveer una presión mayor a la presión de poros encontrada en los estratos a ser perforados. Un exceso en la densidad del fluido puede ocasionar la fractura de la pared de la zanja con la consiguiente pérdida de lodos bentoníticos.

Viscosidad:

Es una medida de resistencia interna que presenta un fluido al desplazarse en función directa a la presión y temperatura. Esta propiedad está muy relacionada con la tixotropía, como se mencionaba anteriormente con características de flujos no lineales, es por eso que se necesitan otros términos para complementar su explicación, como viscosidad aparente o de embudo, viscosidad plástica.

Así mismo, se requiere de una baja viscosidad efectiva para que el lodo desprenda los cortes al llegar a la superficie también debe tener suficiente gelatinosidad para mantener a los cortes sólidos en suspensión cuando el fluido no esté en movimiento. La medida de viscosidad utilizada es con el embudo (viscosímetro Marsh) que se determina en segundos y en un rango normal puede ser de 45 a 75 segundos para los lodos base agua y de hasta 160 segundos para lodos de emulsión inversa.

Esta viscosidad aumenta a medida que los contaminantes son introducidos y/o que el contenido de sólidos se incrementa, por lo que la viscosidad aparente también aumenta. Por el contrario, la viscosidad suele decrecer al aumentar la temperatura y por lo tanto la viscosidad aparente también disminuye.²³

PH (*Potencial Hidrógeno*):

Es el grado de acidez o de alcalinidad en el lodo. La medida del pH en el campo en general se determina colorimétricamente por medio del papel indicador de pH (tornasol) que muestra la variación del color al mojarlo con la solución. En el caso del lodo, se utiliza el líquido del filtrado resultado del mismo. Durante la perforación, el lodo puede sufrir contaminaciones con fluidos provenientes del terreno, modificando con esto sus características reológicas principales.

Filtración.

Conocer la efectividad de la costra impermeable llamada “cake” es muy importante. La naturaleza del agua, así como la de ciertos terrenos, puede influir en la dosificación a emplear, y aún obligar al empleo de aditivos especiales. En algunas ocasiones se efectúan también ensayos de filtrado y control de muestra seca mediante un filtro prensa.

Cantidad de arena

Al vaciar el lodo bentonítico en la zanja, se carga de partículas de arena procedentes del terreno. Es preciso entonces un desarenado o bien sustituir el lodo, de no hacerlo puede crear ciertos problemas justo antes de colarlo y se puede reflejar en el aspecto final del concreto del muro. El desarenado puede hacerse utilizando un tamiz vibrante. Este último sistema presenta generalmente serios problemas debido a los volúmenes a tratar. Posteriormente, se analizarán las pruebas de calidad para tener un buen funcionamiento de los lodos, en la *TABLA 3* se resumen de la siguiente manera:²³

Propiedades.	Fresco	.Reuso	Antes de colar.
Masa Volumétrica (g/ml)	< 1.1	< 1.25	< 1.15
Viscosidad Marsh (s)	32 a 50	32 a 60	32 a 50
Filtración (ml)	<30	<50	-
PH	7 a 11	7 a 12	-
Contenido de arena (%)	-	-	<4
Cake (mm)	<3	<6	-

TABLA 3 Parámetros para medir el control de calidad de lodos bentonítico en el caso de muro Milán.²⁰

Una consideración importante es dejar 1 m el nivel de lodo bentonítico arriba del Nivel de Aguas Freáticas, permitiendo dejar una tolerancia y mantener la estabilidad de la zanja.²⁰

1.4.5 Materiales

Concreto

En general el concreto fresco debe cumplir con las siguientes características:

- Resistencia a la segregación.
- Alta plasticidad.
- Fluidéz.
- Autocompactable.
- Suficientemente trabajable.

Como se mencionaba debe mantenerse una trabajabilidad adecuada. Esto se debe a que no será vibrado y por lo tanto de no cumplir con esta característica es posible que queden vacíos en el interior del muro o simplemente que el concreto no esté presente en el interior del acero de refuerzo

Además, es importante considerar aditivos, los cuales son:

- Plastificantes
 - Retardantes
 - Fluidificantes.
 - Reductor de sangrado.
-
- En cuanto a los agregados, el máximo diámetro no debe exceder los 32 mm o $\frac{1}{4}$ de espacio entre dos varillas longitudinales, el que resulte menor.
 - El contenido de arena menor 4 mm debe estar presente en una cantidad mayor a 40% del peso del agregado total de la mezcla.
 - Otra consideración es que la relación de agua/cemento no debe exceder 0.6.²⁰

Acero

De acuerdo a la norma europea NF 1538 Muro Diafragma, establece que el acero de refuerzo debe tener una resistencia adecuada para cumplir con su diseño y resistir las maniobras de instalación. Algunas de las consideraciones más importantes son:

- Al izarla e introducirla en la zanja la jaula debe estar suspendida del fondo de la excavación al menos 0.2 m.
- El acero longitudinal debe tener una distancia mínima entre varillas de 10 cm.
- La unión entre varillas puede hacerse con traslapes, coples o soldadura, sin embargo, es necesario que sea lejos del dobléz.²⁰
- La distancia entre jaulas y juntas se expresa en la Tabla 4:

Rango		Distancia
De	A	
Jaula	Jaula	400 mm
Jaula	Junta	100 mm

Tabla 4 Distancia mínima entre elementos (jaulas y juntas).²⁰

1.4.6 Anclaje.

Estos sistemas son utilizados al aplicar fuerza en una masa de suelo o roca para mantener o reestablecer su estabilidad. Proporcionan fuerza y de esta manera logran mantener estables los taludes como el que se muestra en la *Ilustración 14 y 16*. Este sistema tiene diversos beneficios como, por ejemplo:

- Adaptarlo a condiciones geotécnicas variadas.
- Utilizar la capacidad de suelo o roca donde se instala como medio de soporte.
- Ocupar menos espacio durante la instalación, comparado con el que se refiere a troqueles, puntales o taludes temporales.
- Mantiene estabilidad en taludes y cortes en situaciones especiales.

Se dice que un anclaje es provisional o temporal si su tiempo de utilización es inferior a 18 meses.¹⁹

Algo que hay que resaltar es cuando se instalan en suelos arcillosos, la magnitud de las cargas que pueden transferirse está limitada por las propiedades mecánicas de dichos suelos (resistencia al esfuerzo cortante relativamente baja, alta deformabilidad y susceptibilidad de sufrir deformaciones diferidas).

Puede ocurrir que las restricciones del proyecto obliguen al uso de anclaje en estos materiales aceptando menor eficiencia y mayores costos, en estos casos, el costo unitario por unidad de fuerza puede llegar a elevarse considerablemente, con lo cual el anclaje baja su competitividad desde el punto de vista económico. Por dicha razón estos sistemas solo suelen ocuparse en la Zona de Lomas o en la Zona de Transición, donde comparando con la Zona del Lago existe una gran presencia de estratos arcillosos.¹⁸



*Ilustración 14 Sistemas de anclaje.*²⁵

Las anclas tienen las siguientes funciones en suelos:

- Elementos de retención o soporte lateral en excavaciones profundas.
- Para equilibrar los momentos de volteo en cimentaciones esbeltas.
- Prevenir expansiones o compensar supresiones en losas de fondo o en el piso de excavaciones.²⁶

25 Tecnianclajes. Anclajes para estabilización de taludes [Citado el 05 de mayo del 2019].
Disponible en: <http://tecnianclajes.com>

26 Tamez E. (2002) Manual de Construcción Geotécnica. SMMS. México

Los anclajes se componen de las siguientes partes mostradas en la Ilustración 15 y en la Tabla 5:

Le	Sobrelongitud exterior. Abarca una cabeza de anclaje que transmite las fuerzas de tracción de la armadura a la estructura que es necesario anclar a través de un sistema de apoyo
Lst	Longitud de bulbo
Llt	Longitud libre
Lsa	Longitud sellada de la armadura, es la sección cubierta por el un bulbo de resina epóxica, en esta longitud de armadura, la fuerza de tracción se transmite al terreno circundante a través de la lechada de sellado.
Lla	Longitud libre de la armadura. es la longitud de armadura comprendida entre la cabeza de anclaje y el comienzo del bulbo.
At	Área de la sección de la armadura

Tabla 5 Elementos de un anclaje.¹⁹

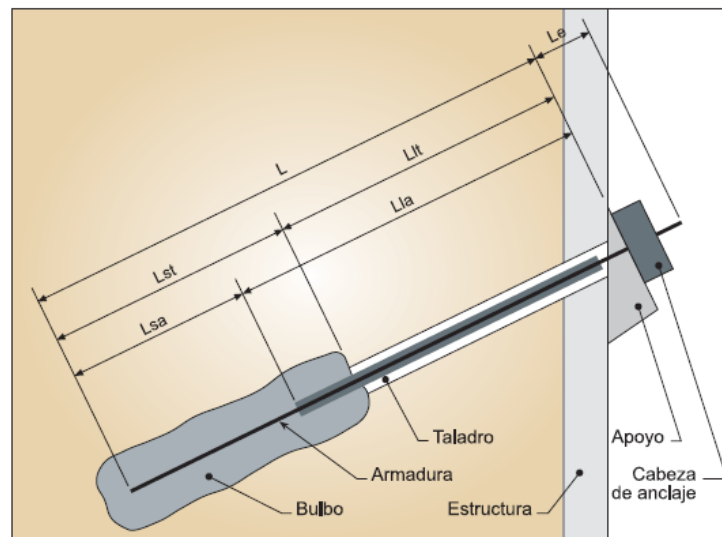


Ilustración 15 Partes del anclaje.¹⁹

Un anclaje puede ser activo o pasivo:

- Activo Trabajan a tensión solamente. No tiene una sección libre
- Pesado Es sometido a carga previamente a la aplicación de las acciones para limitar las deformaciones de la estructura. La armadura más habitual son cables de acero para pretensado.¹⁹

La normativa donde está descrito el proceso constructivo del anclaje está en la norma europea NF EN 1537. Ejecución de los trabajos geotécnicos especiales – Anclajes.¹⁹

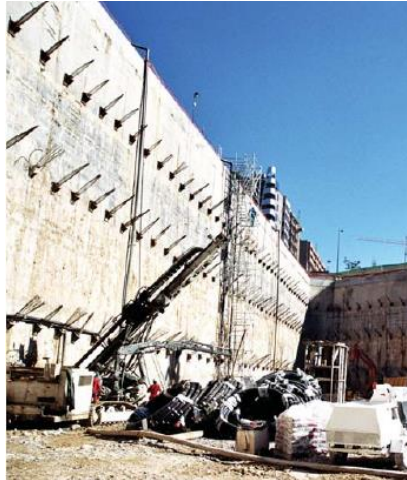


Ilustración 16 Ancljes en un Corte inglés.¹⁹

1.5 Lumbreras.

Es importante considerar este tipo de estructuras en el proyecto University Tower, ya que la subestructura de la torre tendrá dicha forma para aprovechar sus beneficios geométricos y su facilidad de construcción.

Construir lumbreras en la Ciudad de México siempre ha significado desde la década de los sesenta un gran reto para la ingeniería por las condiciones tan desfavorables del suelo, como la que se contruyó para la Ampliación de la Línea 12 del Metro mostrada en la *Ilustración 17*.²⁶

Se tienen dos procedimientos más frecuentemente usados para la construcción de lumbreras en suelos blandos: por flotación y muros Milán. Los principales factores para la elección de uno u otro son:

- El conocimiento de las condiciones geotécnicas y piezométricas del sitio.
- El comportamiento esperado a largo plazo en cada caso.
- Las conclusiones de un análisis de riesgos asociables a las principales actividades constructivas, en cada caso.²⁷



*Ilustración 17 Lumbrera en la Ciudad de México.*²⁸

27 Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica. Análisis y procedimientos constructivos profundo de la ciudad de México. [Citado el 10 de mayo del 2019]. Disponible en: www.revistatyca.org.

28 Reforma. Inquieta Lumbrera a vecino de la MH. [Citado el 30 mayo del 2019] Disponible en: <https://www.reforma.com>

El método de flotación consiste en:

- Construir dos brocales circulares que servirán de guía para excavar una zanja anular hasta la profundidad del proyecto, por medio de perforadora y almeja guiada. En toda esta etapa el suelo desalojado se sustituye por lodo bentonítico. En seguida se demuele el brocal interior y se retira el núcleo de suelo, sustituyendo siempre el material excavado por lodo bentonítico hasta alcanzar la profundidad requerida.
- A continuación, en la superficie del lodo se deposita un tanque metálico en posición invertida con diámetro menor al del brocal exterior, quedando así una holgura entre la periferia del tanque y la pared de la excavación a través de la cual se maneja el nivel y cambio de lodos. Este tanque se convierte en el área de trabajo, sobre la que se efectuará el colado de la losa de fondo y el primer tramo del muro de lumbrera. Durante esta etapa, el sistema tanque-lumbrera en construcción se sostiene del brocal mediante viguetas metálicas, tal y como se muestra en la *Ilustración 18*.^{27 29}



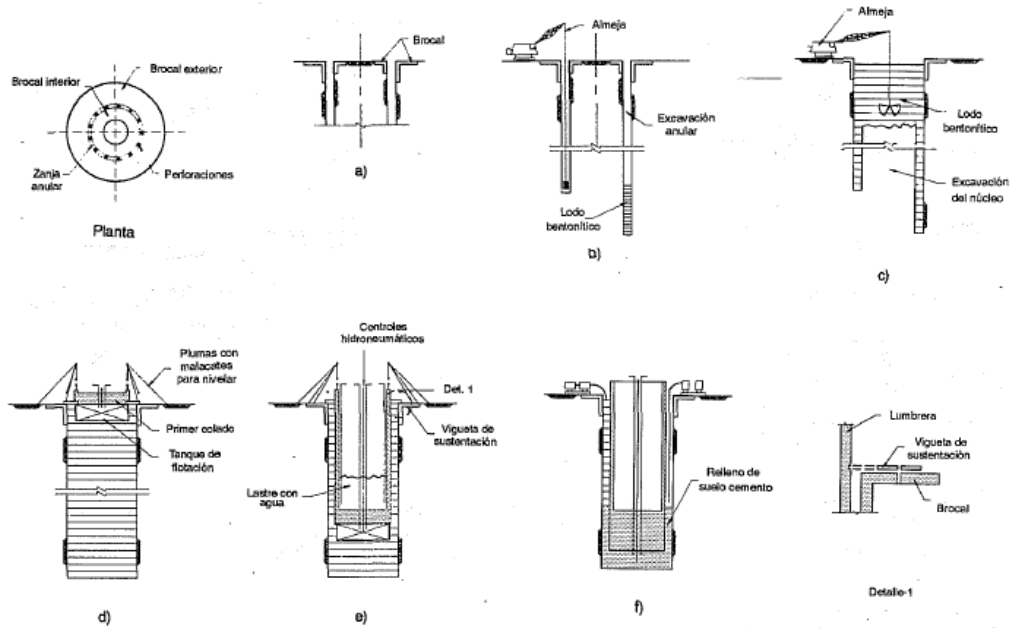
*Ilustración 18 Construcción de Lumbrera por flotación.*²⁹

Al finalizar esta etapa de colado, ahora se inyectará aire en el interior del tanque para permitir la flotación. Después se retiran las viguetas y el sistema queda listo para iniciar lo que se ha llamado primera etapa de inmersión la cual se realiza al desalojar el aire de presión. El desenso se realiza por malacates hasta llegar al nivel requerido para

29 Aguilar M. (2019) “Experiencias en el diseño y construcción de lumbreras, flotadas y con muros Milán, en suelos blandos”. En *Geotecnia* No. 251. pp. 15-25

iniciar la siguiente etapa de colado, en este nivel el sistema tanque lumbrera se ancla al brocal.²⁷

Este proceso de colado inmersión, como se mostró en la *Ilustración 15*, se vuelve a realizar hasta llegar a la profundidad predeterminada. A continuación en la *Ilustración 19*, se resumen las diferentes etapas de este proceso constructivo.



*Ilustración 19 Etapas del proceso constructivo de flotación.*²⁷

Las características de este método suelen ser como las que se muestran en la *TABLA 6*.

Parámetros del Método de Flotación	
Diámetro interior	20 m.
Espesor del muro Milán	0.8 m.
Diámetro exterior de la pantalla perimetral	24.8 m.
Profundidad de pantalla perimetral	35.2 m.
Profundidad máxima de la excavación	33.2 m
Los principales riesgos que se pueden presentar son:	Escasez en los alcances de los estudios geológicos, geotécnicos y geohidrológicos realizados.

	Uso equivocado de criterios de diseño aplicables a infraestructura de superficie.
	Inadecuado diseño estructural del tanque de flotación.
	Inadecuado diseño estructural del tanque de flotación.
	Desfavorables sobreconsumos del lodo fraguante utilizado en la formación de la pantalla perimetral, que se traducen en intrusiones de lodo fraguante que invaden el espacio donde posteriormente se excava el núcleo de la lumbrera.
	Suministro inoportuno del tanque de flotación.
	Inadecuados análisis de los procesos de inmersión y flotación durante la construcción de la lumbrera.

TABLA 6 Características del método de flotación.²⁹

Las lumbreras construidas con Muros Milán como la que se construyó en la *Ilustración 20*, se considera una de gran tamaño, sin embargo de acuerdo al promedio pueden tener las siguientes características aproximadas: (TABLA 7)

Parámetro del Método de Muro Milán	
Diámetro interior	20 m.
Espesor del muro Milán	1.0 m.
Diámetro exterior de la pantalla perimetral	24.8 m.
Profundidad de pantalla perimetral	40 m.
Profundidad máxima de la excavación	33.2 m
Los principales riesgos que se	Uso equivocado de criterios de diseño

pueden presentar son:	aplicables a infraestructura de superficie.
	Inadecuada selección del equipo para la excavación de los muros Milán.
	Pérdida de la verticalidad en la excavación de los tableros de los muros Milán.
	No contar con la logística apropiada para: a) Habilitado y armado de parrillas de acero; b) Almacenaje adecuado de parrillas de acero; c) Izaje y colocación de la parrilla de acero al interior de la zanja previamente excavada, etcétera.
	Falta de experiencia del constructor en la construcción de muros Milán.
	Inadecuado diseño y construcción del sistema de bombeo profundo que se requiere en la periferia de la lumbrera.

TABLA 7 Características del método de flotación.²⁹



Ilustración 20 Excavación del núcleo de lumbrera.²⁹

1.6 Sistema de Top Down.

Además de construir la subestructura con una excavación a cielo abierto, una de las innovaciones más recientes en cuanto a construcción de subestructuras de edificaciones es a través del sistema Top Down.

Se comienza con la construcción de Muros Milán, colocando posteriormente pilotes o pilas en el núcleo donde se situarán los sótanos. A continuación, se construye la losa de la planta baja, ligándola a las pilas coladas anteriormente, las cuales funcionarán como un soporte de la primera losa y de las subsecuentes en las etapas siguientes.

En la etapa anterior se debió dejar un espacio en que se puede excavar una lumbrera donde se puede excavar el material hasta la siguiente losa de desplante del entrepiso. A esta profundidad fácilmente con la maquinaria adecuada se puede excavar debajo de la losa construida anteriormente. Y finalmente se construye la siguiente losa. Se repite este procedimiento constructivo dándole continuidad a la lumbrera hasta llegar la profundidad deseada estableciendo la losa de fondo, como el que se muestra en la *Ilustración 21*.

Ahora que se conoce el procedimiento es importante tomar las siguientes consideraciones:

- No dañar las pilas o pilotes y el muro Milán, debido a la afectación de sus propiedades como la resistencia.
- Abatir el manto frático³⁰

30 Poulos. H (2015). Cimentaciones para edificios altos. Métodos de diseño y aplicaciones., No. 235, Geotecnia En pp. 31-35.



Ilustración 21 Sistema Top Down de un sótano de edificio..³¹

1.7 Cimentaciones de edificios altos en la Zona Centro de la Ciudad de México.

Es muy común en la Ciudad de México, que los edificios altos se encuentren rodeados por edificios pequeños que son de altura y que están sometidas a cargas mucho más pequeñas. Es necesario controlar los asentamientos que existen entre estas estructuras.

Otro aspecto que afecta a este tipo de estructuras son las cargas por viento y los momentos que genera el sistema de cimentación son muy altos, lo que aumenta las cargas verticales. Las cargas inducidas por viento y sismo son de naturaleza dinámica y pueden producir la resonancia de la estructura, en particular la generada por los modos más altos de vibración.

Las construcciones de edificios de mayor altura eran totalmente impracticables hasta que se descubrió que podían ser anclados en bancos de arena o de arcilla relativamente firmes, situados a 30 o 45 m

Las opciones de cimentación más comunes para edificios altos son las losas compensadas, las piloteadas o la combinación de ellas. Muchos rascacielos se construyen con losas peraltadas y también se utiliza la losa de cimentación en combinación con pilotes que, en conjunto, satisfacen los criterios de capacidad de carga y de asentamientos.²⁹

31 Cimesa (2016) "Proyectos" [citado el 2019-03-18] Disponible en <http://www.cimesa.net/>

1.7.1 Ejemplo 1 Torre Latinoamericana.



*Ilustración 22 Torre Latinoamericana.*³²

El edificio tiene 182 m, cuenta 43 pisos como se muestra en la *Ilustración 22*, convirtiéndose en el primer rascacielos en construirse en una zona de alto riesgo sísmico, por lo cual sirvió de ejemplo para la cimentación y construcción de futuros edificios en el mundo. En este proyecto se introdujeron innovaciones y soluciones a distintos problemas geotécnicos de la zona, por lo que es un antecedente importante para el estudio del proyecto University Tower.

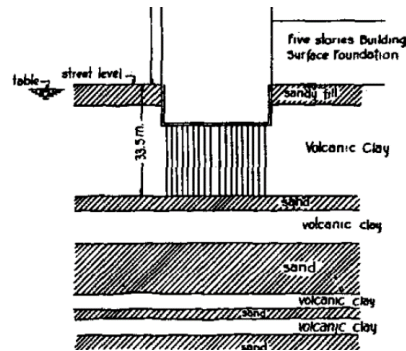
Está ubicada en la esquina de Francisco I. Madero y Eje Central. Ocupa un área de 1114 m².³³

Descripción de cimentación

³² Expansión. La Torre Latinoamericana, símbolo de la resistencia a los sismos en México [citado 2019-04-15]. [En línea] Disponible en: <https://politica.expansion.mx>.

³³ Torre Latinoamericana. (2019) Torre Latino [citado 2019-03-10]. [En línea] Disponible en: <http://torrelatinoamericana.com.mx/>

Se tiene en la zona conocida como del Lago, en la cual se presentan una costra superficial dura; una secuencia de arcillas muy blandas intercaladas



con estratos delgadas de arena, vidrio volcánico y fósiles en estrato resistente de limo arenoso cementado de espesor variable; una segunda secuencia de arcillas y finalmente depósitos aluviales profundos, tal y como se muestra en la *Ilustración 23*.³⁴

Fue necesario realizar una excavación de 13.5 m en la profundidad, utilizando tablaestacas Wakefield en el perímetro para proteger edificios históricos adyacentes.¹⁸

Proceso constructivo

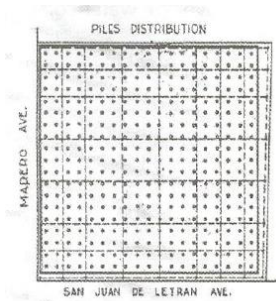
La tablestaca se colocó a 15 m de profundidad, debido a la presencia de lentes de

*Ilustración 23 Cimentación de Torre Latinoamericana.*³⁴

arena hasta 13.5 m. Para evitar que las construcciones vecinas no sufrieran variaciones en la presión hidráulica del suelo, el agua que se extrajo del interior de la excavación se inyectó en el exterior de la tablestaca utilizando cuatro pozos de absorción. Cada pieza estuvo formada por 3 tablonces de madera de 2 ½" x 12", unidos entre sí con dos hileras de pernos de 3/8". En la punta fue colocada una protección de lámina de cobre para impedir que se dañara la punta durante el hincado, que se realizó con un martillo de caída libre de 950 kg de peso, desde una altura de 1 m, con una frecuencia de 5 Hz.

34 Zeevaert L. (1957) Foundation design and behaviour of Tower Latino Americana in Mexico City. En: Geotechnique.

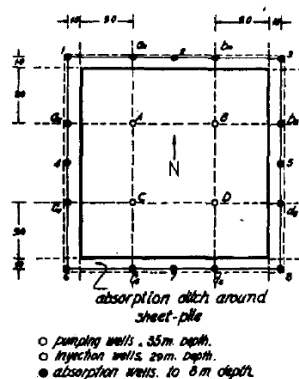
Se hincaron 361 pilotes de concreto a una profundidad de 33.5 m de profundidad a la capa dura de arena. La distribución de pilotes se encuentra en la *Ilustración 24*.³⁴



*Ilustración 24 Distribución de pilotes.*³⁴

El sistema hidráulico consistía en colocar cuatro pozos de bombeo que suministraban agua al exterior del perímetro a través de pozos de inyección a profundidades de 12, 16, 21 y 28 m. El propósito de este proceso fue abatir el nivel de manto freático y evitar una falla de fondo por subpresión, causada por la diferencia de presión hidrostática, este fenómeno podría producir un levantamiento del fondo la excavación.

En la *Ilustración 25* se muestran los tres tipos de pozos que se colocaron durante la excavación: bombeo, inyección y de absorción.



*Ilustración 25 Ubicación de pozos.*³⁴

La excavación se hizo por partes, bajando cada vez 3 m., se colocó un sistema de arriostramiento de lado a lado de la excavación, apoyándose en los pilotes.³⁴

La planta fue dividida en paneles soportados por bloques de madera, permitiendo que sean cubiertos. A continuación, en las *Ilustraciones 26* se puede ver la configuración de trabes de los sótanos cuando estaba en construcción.³⁴



*Ilustración 26 Vista de sótanos de la Torre Latinoamericana. Durante y después de su construcción.*³⁵

1.7.2 Ejemplo 2 Torre Mayor.

Se ubica en el número 505 del Paseo de la Reforma, del lado norte, en la Ciudad de México, (*Ilustración 27*). En sus 225 m de altura, aloja 55 niveles sobre la calle y cuatro por debajo de ésta, ocupa un terreno casi cuadrado de 80 m por lado, limitado por Paseo de la Reforma y las calles Río Ródano, Río Atoyac y Río Elba, en la colonia Cuauhtémoc.

Su construcción se llevó a cabo entre 1997 y 2002, y se inauguró en 2003 con el reconocimiento de ser el edificio más alto de América Latina, distinción que conservó hasta el año 2010.³⁶

35 Tripod. Construcción y Comportamiento de la Torre Latinoamericana. [citado 2019-04-23]. [En línea] Disponible en: <http://zeevwolff.tripod.com>

36 Schmitter J.(2016) "Pruebas de carga en Pilas de Cimentación de la Torre Mayor". En Geotecnia No. 240. pp. 19-21



Ilustración 27 Torre Mayor.³⁷

La torre fue diseñada estructuralmente para soportar un sismo de hasta 9 grados en la escala de Richter, y entre sus particularidades cuenta con 28 amortiguadores sísmicos.

La zona geotécnica donde se construyó la Torre Mayor es de origen lacustre, se trata de la denominada Zona de Transición, que está en contacto con Zona de Lomas. El subsuelo del sitio presenta como estratigrafía:

- Manto superficial, (0 a 5.0 m) Limos arenosos (ML)
- Formación arcillosa superior (5.0 a 25.5 m) Arcilla (CH) de consistencia blanda a muy firme.
- Primera capa dura (25.5 a 29.5). Limos arenosos (ML).
- Formación arcillosa inferior (29.5 a 32.0 m).
- Depósitos profundos (32.0 a 60.0 m). Arenas limosas (SM) muy compactas, son intercaladas de limos arenosos (ML).

El nivel freático del sitio se detectó a los 5.0 m de profundidad y la distribución piezométrica del subsuelo es razonablemente hidrostática hasta los 8.0 metros de profundidad, después de lo cual presenta una significativamente pérdida de presión.

Descripción de la cimentación.

37 Casasola T. (2016) Torre Mayor, el "Empire State" de la Ciudad de México. [citado 2019-04-05]. [En línea] Disponible en: <https://www.eluniversal.com.mx>

El proyecto arquitectónico de la torre contempló la ejecución de cuatro niveles subterráneos para alojar estacionamientos; con ese objetivo se excavó toda el área de sustentación hasta una profundidad de 16.0 m.

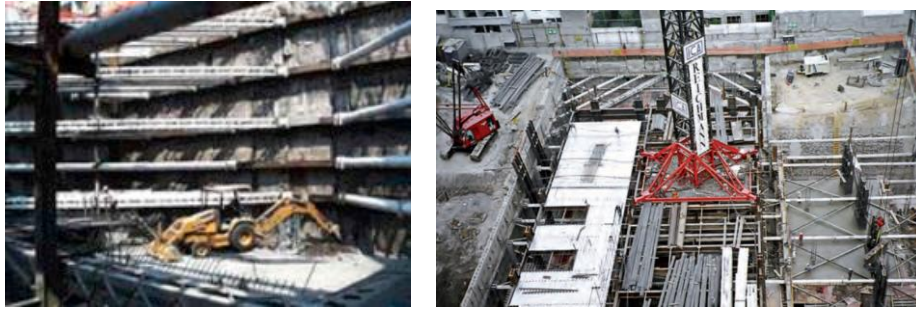
Al distribuir el peso de la torre, estimado en 200, 000 toneladas, entre su área de sustentación de 6, 320 m², se obtiene una presión de 28.5 t/m² cuya solución de cimentación se resolvió mediante 251 pilas coladas en sitio, apoyadas en los depósitos profundos a una profundidad comprendida entre 46.0 y 52.0 m con respecto a la superficie del terreno, definidas por los diseñadores de la torre en función de las cargas actuantes y de los resultados de las pruebas de a carga realizadas. Noventa y una de las pilas se construyeron con un diámetro de 1.0 m, treinta pilas de 1.2 m y ciento treinta de 1.5 m.³⁶

Proceso constructivo.

Su procedimiento constructivo convencional, mediante perforación previa, estabilización con el lodo bentonítico, colocación de armado y colado de concreto mediante tubería Tremie se llevó a cabo desde una plataforma de trabajo ubicada casi 4 m por debajo de la superficie original del terreno. Este desnivel fue causado por la extracción de materiales de demolición, asociados a las cimentaciones de antiguas construcciones preexistentes que fueron retiradas.

Para distribuir el peso de la estructura de la torre sobre la cabeza de las 251 pilas de cimentación, se construyó una gruesa losa de repartición de cargas con un espesor de 2.8 m, por encima de la cual se construyeron los cuatro niveles subterráneos.

A medida que se fue excavando cada parte se comenzó el troquelado para mantener la estabilidad en las paredes, hasta construir la losa de fondo. Este troquelado se puede apreciar en la *Ilustración 28* en donde se puede ver su aplicación en diferentes posiciones.³⁶



*Ilustración 28 Cajón de cimentación de Torre Mayor.*³⁶

1.7.3 Ejemplo 3 Torre Reforma.

La Torre Reforma mostrada en la *Ilustración 29*, se encuentra ubicada en el número 505 de la avenida Paseo de la Reforma. La torre tiene una altura de 246 m y 57 pisos.



*Ilustración 29 Torre Reforma.*³⁸

Descripción de la cimentación.

38 BBC. Torre Reforma: el edificio mexicano ganador del Premio Internacional de Rascacielos 2018. [citado 2019-04-05]. [En línea] Disponible en: <https://www.eluniversal.com.mx>.

El edificio ocupa actualmente un área total de 2780 m². Por debajo del nivel de calle, es de 10 niveles de sótanos para estacionamiento. Las losas que conforman los sótanos mostrados en la *Ilustración 30*, no tienen continuidad horizontal en toda el área, ya que forman desniveles con diferencia de altura entre ellas de 1.5 m y están conectadas a través de rampas de circulación.

39



*Ilustración 30 Cimentación de la Torre Reforma.*⁴⁰

Proceso constructivo

La estructuración del cajón de cimentación consiste en un muro Milán estructural de 120 cm de espesor, el cual deberá estar apoyado lateralmente al interior del núcleo durante el proceso de excavación, así como en su condición definitiva, a través de las losas de los sótanos. El sistema de piso para los niveles de sótanos propuesto se compone de losas planas rígidas, las cuales funcionarán como diafragmas rígidos horizontales capaces de tomar los empujes laterales del suelo transmitidos por el muro Milán. Cada una de las losas estará apoyada verticalmente a los muros interiores y estarán ligadas al muro Milán. Conforme se vayan construyendo las losas, se debe realizar su unión estructural con las columnas metálicas y con el muro Milán.³⁹

1.7.4 Ejemplo 4 Down Town Santa Fe.

39 Merchand A. (2015) En Construcción: Torre Reforma / LBR + A. [citado el 2019-04-23] En línea. Disponible en: <https://www.archdaily.mx>

40 Suárez L. (2012) Diseño de la Cimentación de Torre Reforma. [citado el 2019-04-29] Disponible en <http://oa.upm.es/>

Es un exclusivo conjunto corporativo, consiste de tres torres para oficinas ubicado en el corredor de negocios en Santa Fe, Ciudad de México. Las torres, cuentan con 206, 198 y 173 pisos de altura, respectivamente. Como se mencionó en los Antecedentes, este proyecto tiene una gran semejanza con University Tower por la geometría usada en la cimentación, vista en la *Ilustración 31*.⁴¹



*Ilustración 31 Downtown Santa Fe. Cimentación.*⁴²

Descripción de la cimentación.

Se tenía planeado en un principio del proyecto hacer un gran cajón de cimentación con 8 sótanos. La estabilización de esta cimentación se haría a base de pilas secantes de concreto reforzado empotradas a 10 m por debajo de la excavación. Además, se tenía planeado un sistema de anclaje con cargas de bloqueo de entre 90 y 120 t, distribuidas en una retícula de 2.7 m x 2.7 m.

Analizando otras alternativas se propuso cambiar a partir del segundo sótano, la geometría de la cimentación sería ahora circular, haciéndola más estable, omitiendo el uso de anclaje. Se instalaron anillos de concreto para que la excavación sea auto estable. A medida que se va avanzando en este concepto se colocan dichos anillos. La pantalla de pilas que se colocó en el perímetro son de tipo STARSOL. Dicho perímetro tiene una longitud de 80.7 m de diámetro interior. Cabe resaltar que esta es la primera torre construida con una cimentación con forma de lumbrera en el país.

41 Paulin J. y Cirion A. (2014). Análisis y diseño del sistema de estabilización para una excavación circular de gran diámetro dentro de suelos re-depositados (rellenos heterogéneos de mala calidad) y tobas, en un predio ubicado al poniente de la Ciudad de México. En XXVII Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica.

42 Cimesa (2016) "Proyectos" [citado el 2019-03-18] Disponible en <http://www.cimesa.net/>

Proceso Constructivo.

Este proyecto tomó en cuenta dos geometrías completamente diferentes, empezando con 2 sótanos, una con forma y dimensiones similares al predio. En estos primeros sótanos se estabilizaron los taludes con concreto lanzado, estructural y además se le instaló un sistema de anclaje, así como se tenía considerado hacer a toda la subestructura en un principio.

A partir de los 8 m se comenzó con el cambio de forma, así que se construyó una pantalla circular de pilas de concreto simple de 62 cm de diámetro resistencia de $f'c=50\text{kg/cm}^2$ con una almeja STARSOL. Posteriormente se llevó a cabo la excavación del núcleo, los anillos se construyeron con concreto lanzado. En el caso de University Tower la construcción de esta lumbrera se hizo con paneles de muro Milán al igual que los barrettes, los cuales se verá a detalle más adelante.⁴¹

1.8 Medidas de Seguridad.

La construcción es una industria que caracteriza por su riesgo al desarrollarse. Suele tener una elevada tasa de accidentes, los cuales tienen costos sociales y económicos. Los trabajadores recurrentemente tienen incapacidades permanentes y hay una elevada tasa de mortalidad a causa de riesgos existentes en las obras de construcción.

Esta situación ocasiona que se hagan esfuerzos para mejorar las condiciones del ambiente en el trabajo y elevar la calidad de los trabajadores.

En 2015 se registraron 425 mil accidentes laborales y murieron 1107 trabajadores, de los cuales, 37 mil accidentes y 220 muertes corresponden a trabajadores de la construcción.⁴³

En México la norma que regula en estos proyectos todas las medidas de seguridad, se describen en la NORMA Oficial Mexicana NOM-031-STPS-2011, Construcción-Condiciones de seguridad y salud en el trabajo. En dicha norma engloba aspectos como la seguridad que un patrón debe proveer a los trabajadores y las responsabilidades que ellos tienen. Abarca distintos temas sobre medidas de seguridad al utilizar maquinaria y herramientas para trabajos especializados.

A continuación, se estudiarán algunas de las medidas de seguridad expresadas en la NORMA Oficial Mexicana NOM-031-STPS-2011, Construcción-Condiciones de seguridad y salud en el trabajo, las cuales se aplican en este tipo de proyectos.⁴⁴

1.8.1 Obligaciones del patrón y trabajadores.

43 Noticieros Televisa (2016) “220 albañiles mueren cada año en México por accidentes de trabajo” [citado el 2019-05-18] Disponible en <https://noticieros.televisa.com>

44 Diario Oficial de la Federación (2011) NORMA Oficial Mexicana NOM-031-STPS-2011.Construcción-Condiciones de seguridad y salud en el trabajo. [citado el 2019-05-18] Disponible en: <http://dof.gob.mx>

Al analizar la NORMA Oficial Mexicana NOM-031-STPS-2011, se puede decir que se aplica de diferente forma a las dos partes. Se nombran como patrón y trabajador, los cuales tienen obligaciones distintas.

1. Una descripción de los riesgos a las actividades que los trabajadores van a elaborar y las medidas de seguridad que deben seguir.
2. También el patrón debe hacer un programa donde se tomen en cuenta la maquinaria utilizada en la obra y detallar los riesgos que puede ocasionar.
3. Un aspecto muy importante es proporcionar a los trabajadores el equipo de protección personal básico, de acuerdo a las actividades que estén realizando y a su puesto de trabajo
4. Para cumplir el punto anterior es necesario que existan brigadas en donde se supervisen que los trabajadores porten su equipo de protección personal.
5. Exista la señalización suficiente tanto en el interior como en el exterior de la obra.
6. Dar capacitación a los trabajadores sobre las medidas de seguridad, antes de comenzar la obra o el trabajo que van a empezar a realizar.

Por otra parte, las obligaciones de los trabajadores deben de cumplirlas para asegurar su seguridad:

1. Todos los trabajadores deben desarrollar sus actividades conforme al sistema de seguridad y salud en la obra y en las autorizaciones para realizar trabajos peligrosos.
2. Utilizar el equipo de protección personal proporcionado por el patrón en todo momento.
3. Asistir y participar en la capacitación o información sobre seguridad y salud en el trabajo que el patrón les proporcione.⁴⁴

1.8.2 Equipo de protección.

Un punto muy importante en este tema, es el uso de equipo de seguridad de los trabajadores, que involucra en las obligaciones tanto a los trabajadores como a los patrones.

El equipo de protección debe ser previsto en la etapa de planeación de la obra para lo cual deberá considerarse en primer lugar que cumpla con los requisitos que exija la seguridad de los trabajos a realizar.⁴⁴

Para cumplir lo dicho en el párrafo anterior, es importante contar con una lista de control o verificación de los equipos que revise sus condiciones generales.

De acuerdo a la norma, se mencionan a continuación en la Tabla 8, 9 y 10. algunos ejemplos de trabajos.⁴⁴

Albañil



Parte del cuerpo	Equipo básico	Equipo especial	
Cabeza	Casco contra impacto.	Casco Dieléctrico	 <p>Ilustración 32 Albañil.⁷</p>
Torso	Chaleco de seguridad.		
Ojos y Cara	Anteojos de protección.		
Aparato Respiratorio		Mascarilla desechable o si es su caso equipo de respiración autónomo.	
Extremidades Superiores.		Guantes contra sustancias químicas o dieléctricos.	
Extremidades Inferiores	Calzado contra impactos.	Calzado Dieléctrico. Botas Impermeables.	
Otros	Chaleco Reflejante.	Equipo de protección contra caídas de altura	

TABLA 8 Equipo de seguridad de un albañil.⁴⁴



Fierrero.

Parte del cuerpo	Equipo básico.	Equipo especial.	
Cabeza	Casco contra impacto.	Casco Dieléctrico.	 <p>Ilustración 33</p>
Ojos y cara	Anteojos de protección.		
Oídos	Tapones auditivos		
Extremidades Superiores	Guantes	Guantes dieléctricos.	
Extremidades	Calzado contra	Calzado dieléctricos.	

inferiores	impactos.		<i>Fierrero.</i> ⁷
Otros	Chaleco Reflejante.	Equipo de protección contra caídas de altura.	

*TABLA 9 Equipo de seguridad de un fierrero.*⁴⁴

Soldador con arco eléctrico.

Parte del cuerpo.	Equipo básico.	Equipo especial.	
Cabeza.	Casco contra impacto. Casco dieléctrico. Capuchas o monjas.		 <p><i>Ilustración 35 Equipo de seguridad de Soldador de arco eléctrico.</i>⁷</p>
Ojos	Careta de soldador.		
Oídos	Tapones auditivos.		
Extremidades Superiores	Guantes dieléctricos. Guantas contra temperaturas extremas. Mangas.		
Tronco	Mandil contra altas temperaturas		
Extremidades Inferiores	Calzado contra impactos. Calzado dieléctrico. Polainas.		
Aparato Respiratorio	Respirador contra gases y vapores	Equipo de respiración autónomo	
Otros	Chaleco reflejante.	Equipo de protección contra caídas de altura.	 <p><i>Ilustración 34 Posicionamiento de máquina para soldar.</i>⁷</p>

*TABLA 10 Equipo de seguridad de un soldador.*⁴⁴

Este último trabajo, tiene consideraciones relevantes debido a los diversos riesgos que existen al ejecutarse. De acuerdo a la NORMA Oficial Mexicana NOM-031-STPS-2011, los trabajos de soldadura requieren las siguientes medidas:

- Colocar mamparas o pantallas alrededor del puesto de soldadura durante todo el tiempo de la actividad.

- Mantener los materiales inflamables y combustibles a una distancia mínima de 10 m.
- Impedir que se realicen trabajos cuando el área esté mojada o, en su defecto, aislar el área sobre una base de madera.⁴⁴
- Evitar que se jalen los cables, aun cuando éstos se atoren u opongan resistencia a su manejo.

1.8.3 Seguridad en excavaciones

En una obra de estas magnitudes, se debe contar con un análisis de riesgos potenciales en excavaciones, y se debe realizar un estudio de mecánica de suelos para saber su composición física y las propiedades mecánicas que posee.

Se deben extraer todo tipo de instalaciones colocadas anteriormente, esto incluye tuberías, ductos entre otras redes de infraestructura.

La inclinación máxima considerada en taludes debe ser de acuerdo al tipo de material de la excavación (*Tabla 11*).

Tipo de suelo o roca	Inclinación máxima para excavaciones de profundidad inferior a 6 m
Roca estable	Vertical (90°)
Tipo A ¾ : 1	(53°)
Tipo B 1 : 1	(45°)
Tipo C 1 ½ : 1	(34°)

TABLA 11 Tipos de suelo de acuerdo a su inclinación máxima.⁴⁴

En el caso de las excavaciones realizadas en la trabe de coronamiento y la construcción de las ménsulas, se utilizarán las especificaciones de material Tipo B de 45° como máximo para tener una estabilidad en los taludes.

En zanjas mayores a 1.2 m se debe tener una escalera que permita la entrada y salida de trabajadores.

También es importante considerar en este rubro, mantener la maquinaria y equipo, en especial los que cuenten con brazo, equipos de izaje y otros similares, a una distancia mínima de seguridad.⁴⁴

1.8.4 Señalización.

La señalización es un medio de informar medidas para prevenir. Estas herramientas desempeñan un papel vital en la comunicación de información de seguridad dentro de una obra. De acuerdo a la NORMA Oficial Mexicana NOM-031-STPS-2011 se establece lo siguiente:

- El color de los símbolos debe ser el mismo que el color contrastante, correspondiente a la señal de seguridad e higiene, excepto en las señales de seguridad e higiene.

El texto que contiene la señalización de la obra debe ser:

- La altura del texto, incluyendo todos sus renglones, no será mayor a la mitad de la altura de la señal de seguridad e higiene.
- El texto está ubicado abajo de la señal de seguridad e higiene.
- Deben ser breves y concretos, con un máximo de tres palabras.
- El color del texto será el mismo que el color contrastante.⁴⁴

1.9 Control de calidad.

La calidad es un punto muy importante en la construcción, se trata de cumplir con los requerimientos que ofrecen las características de un material en relación a lo que se exige en un determinado proyecto.

Así que se puede definir el control de calidad como el conjunto de esfuerzos, principios, prácticas y tecnología de una organización de producción o industria para asegurar mantener o superar la calidad del producto al menor costo posible. Las actividades de control de calidad en una obra son:

Preventivas: La realización de investigaciones y la elaboración de especificaciones y proyectos realistas.

Control de procesos: Durante este paso se deben cumplir las especificaciones y proyecto en las etapas intermedias de producción o construcción.

Verificación del proyecto u obra, es decir tanto de los materiales la bentonita, concreto y acero apegándose a las normas correspondientes.

El control de calidad debe realizar la retroalimentación para que las experiencias que se hayan tenido durante la construcción y elaboración.⁴⁴

1.9.1 Lodos bentoníticos.

Los lodos bentoníticos representan tienen un papel determinante para el desarrollo de la obra, por lo que es vital llevar a cabo un buen control de calidad. Para el proceso de elaboración de lodos bentoníticos, las normas que engloban el control de calidad son:

ASTM D 4380-93e	Test methods for density of bentonitic slurries.
ASTM D 4381-93e	Test methods for sand content by volume of bentonitic slurries.
API-RP13 B1-97	Standard producers for field tasting water bases drilling fluid.
ACI 336.1 y ACI 336.1R-98	Reference specifications for the construction of drilled piers and commentary

TABLA 12 Normatividad de lodos bentoníticos.¹⁸

A partir de las normas enunciadas en la Tabla 9, se puede supervisar la producción de lodos bentoníticos, la cual se estudia posteriormente.

1.9.1.1 Producción de lodos bentoníticos,

Es necesario conocer a fondo el proceso de producción de lodos bentoníticos para asegurar el control de calidad y asegurar las propiedades predeterminadas para el proyecto.

Lo primero que se debe considerar es el consumo que se tendrá de lodos bentoníticos, y tomar en cuenta por ejemplo el lodo ocupado en caso de que se tenga una excavación irregular producida por la almeja, la penetración que pueda llegar a tener el lodo en las paredes del terreno, el que pueda llegar a envolver a la almeja al excavar, el que pueda llegar a quedarse en el material que se extrajo, y el que se endureció en el panel colindante.

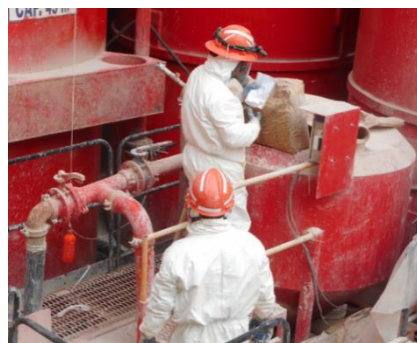


Ilustración 36 Dosificación de bentonita.⁷

Posteriormente se inicia la fase de “Mezclado” e “Hidratado”, en un tanque de preparación utilizando el mezclador.

Después se vacía la bentonita (*Ilustración 36*) en la tolva y se va incorporando poco a poco el agua que sale a presión por la parte inferior.



Ilustración 37 Silos de lodos bentoníticos.⁷

Por 15 minutos se mezcla en una tubería de circuito cerrado usando una bomba de lodos. Después de este proceso se obtiene una mezcla homogénea de lodos. Este estado se llega después de mezclar durante 24 horas. Uno de los problemas de no hacerlo bien es: No se dosifique bien la bentonita, desperdiciando una mayor cantidad, se pueden mostrar los contenedores en la *Ilustración 37*.

El siguiente paso es enviar todo el lodo bentonítico producido hasta este momento, a un tanque mezclador donde se le dosifica cemento. Se hace un batido por 10 minutos en donde se mezcla con paletas movidos por un

motor. Este paso debe ser realizado justo antes de disponer de este material, para evitar el fraguado, por lo que se recomienda agregar aditivos para retardar lo más posible el fraguado.¹⁸

Después se traslada el lodo bentonítico producido a la zanja, por medio de un conducto, el cual en el caso del proyecto University Tower se encuentra en el tope (*Ilustración 38*), que atraviesa la Calle de Viena. Esta tubería conduce el lodo vaciándolo a presión, conforme la excavación progresa

Después de colarse un panel, el lodo utilizado en ese segmento se puede contaminar de partículas sólidas durante la excavación, por tal razón el lodo no suele reunir con las propiedades de control de calidad. Por lo tanto, se bombea un regenerador de lodos bentoníticos, esta maquinaria cuenta con desarenadores que permite que los lodos vuelvan a tener sus propiedades óptimas.

Una vez que el lodo ya se ha reutilizado y su regeneración resulte antieconómica se deben eliminar, se llevan a sitios donde se produzca un menor riesgo de contaminación ambiental.

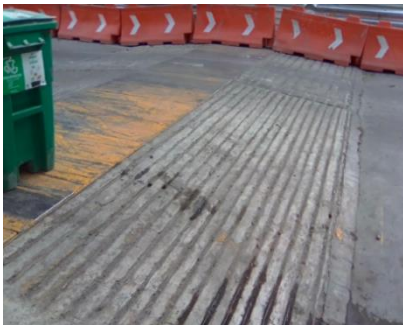


Ilustración 38 Tope construido para fines de la obra.⁷

Las especificaciones de las propiedades que debe tener el lodo bentonítico son las ya mencionadas en *Tabla 3*. La calidad de la bentonita es esencial para asegurar una buena estabilidad en la obra, por lo tanto, al inicio de cada turno se deben hacer pruebas de calidad para demostrar que los lodos se encuentran en óptimas condiciones para ser usados en la excavación o en su caso reutilizados.

Con este procedimiento, se deben realizar pruebas a los lodos bentoníticos para asegurar su calidad y poder hacer ajustes en su dosificación en caso de no cumplir con los resultados ideales.¹⁸

1.9.1.2 Pruebas de control de calidad a lodos bentoníticos.

Como se estudió en capítulos anteriores cuando se analizó la TABLA 3, la bentonita tiene diversas propiedades las cuales deben de evaluarse frecuentemente para asegurar su control de calidad.

1.9.1.2.1 Determinación de viscosidad.

Como se estudió en la sección 1.4.4, la viscosidad juega un gran papel en el comportamiento del lodo. Recordemos que la viscosidad está relacionada con la resistencia del lodo y la tixotropía que se ejerce en las paredes.

Para realizar la prueba se usa el Embudo de Marsh y el Vaso de Marsh. El primero está dividido en dos compartimientos, integrando una malla. La malla sirve para retener la arena y cualquier otra impureza que llegue a obstruir el embudo. En esta sección se vierte la muestra de lodo bentonítico. Al realizar esta acción se debe tapar la salida del embudo para poder sincronizar la prueba y tomar el tiempo.

Las medidas del embudo o cono de Marsh son las que se muestran en la Tabla 12.

Diámetro superior	152 mm
Longitud de boquilla	50 mm
Longitud total	304 mm

*TABLA 12 Medidas del Embudo de Marsh.*¹⁸

Aproximadamente tiene una capacidad 0.946 litros.

1.9.1.2.2 Determinación de masa volumétrica.

Como se había mencionado anteriormente, la densidad permite una óptima velocidad de penetración al contrarrestar la presión del terreno, sin provocar pérdidas de circulación.

Para desarrollar esta prueba es necesario el uso de una Balanza Baloid. Este instrumento tiene un depósito de lodo bentonítico de 150 cm³. El primer paso es calibrar la balanza, con agua asegurando que esta como resultado exactamente $1 \frac{g}{cm^3}$. Tomando en cuenta este punto se vierte la bentonita, sin derramar fuera del recipiente, esto puede alterar la medición.

Posteriormente se suelen dar golpes en la base del depósito para quitar las burbujas de aire.

La balanza esta graduada de tal manera que se pueda leer fácilmente la densidad.

1.9.1.2.3 Determinación de contenido de arena.

El contenido de arena en los lodos bentoníticos, afectan a la resistencia del cake, facilitando su agrietamiento, por tal razón se deben extraer al ser utilizadas.

Para desarrollar esta prueba es necesario utilizar un eleutiometro, el cual es un recipiente graduado de 500 cm³, un embudo, una probeta y una malla. El primer paso es tomar una muestra de lodo bentonítico y verterlo en el eleutiometro hasta la señalización graduada en el recipiente.

El siguiente paso es colocar ese volumen de lodo bentonítico a la malla, causando que la arena se acumule.

Ahora se debe colocar el embudo en la malla del tubo, posteriormente invertirlo. Se vierte agua en la malla dejando caer la arena que se acumuló

en el eleutiometro. Finalmente se mide el porcentaje de arena del volumen de lodo estudiado. Esta medida se encuentra graduada en el recipiente.¹⁸

Esto demuestra que efectivamente es un lodo reutilizado lo que se ve reflejado en el alto contenido de arena. En la siguiente prueba, la alta cantidad de arena se percibe en el grosor de la capa del cake.¹⁸

1.9.1.2.4 Determinación de espesor de película impermeable y filtración.

Esta película impermeable o también conocida como “cake”, se puede apreciar en las paredes de la zanja y tiene como propósito desarrollar y aplicar la presión del fluido estabilizador a las paredes de la excavación.

El propósito de esta prueba es analizar cómo está funcionando el lodo bentonítico. Como ya se había comentado en capítulos anteriores, una de las principales funciones del lodo es ser impermeable creando una película en las paredes de la excavación. Esta prueba se centra en analizar la calidad de este elemento.

El procedimiento de la prueba se realiza de la siguiente manera:

Se llena de lodo bentonítico una filtroprensa, el cual es un recipiente que en conjunto con CO₂, se tiene una presión dentro del recipiente de 100 bares. Con esta presión se intenta filtrar agua contenida del mismo lodo, poniendo a prueba la película impermeable.

Con la cápsula que se muestra a continuación se simula la presión interna de la excavación.

Para finalizar esta prueba, se mide el espesor del cake, así que el procedimiento se realizará desarmando la filtroprensa.

Después se desprende una parte y con una regla se mide el grosor de esta capa:¹⁸

1.9.1.2.5 Determinación de PH

Con el PH, se puede asegurar que no haya contaminantes en la mezcla. Existen dos formas de obtener resultados en esta prueba:

- Una forma es utilizando lodo bentonítico directamente en el papel tornasol, y como resultado se tenga una muestra alcalina, es decir con un pH entre 7 y 11. Sin embargo una gran desventaja de hacerlo de esta manera es que el mismo lodo impide tener una visión clara del color del papel, dificultando su medición.
- Lo más común es usar agua obtenida de la filtración del lodo en la prueba anterior.

Es importante considerar que las medidas de las propiedades de los lodos bentoníticos varían de acuerdo a la obra que se va a realizar. No es lo mismo las utilizadas en una perforación petrolera a las usadas en un muro Milán o un barrete. Por ejemplo, en caso de los muros Milán se utiliza en expresado en la Tabla 3, en cambio para barretes se utiliza el siguiente, expresada en la Tabla 13:

Propiedades.	Fresco	Reuso	Antes de colar.
Masa Volumétrica (g/ml)	< 1.1	-	< 1.15
Viscosidad Marsh (s)	32 a 50	32 a 60	32 a 50
Filtración (ml)	-	<50	-
PH	-	7 a 12	-
Contenido de arena (%)	-	-	<4
Cake (mm)	-	<6	-

TABLA 13 Parámetros para medir el control de calidad de lodos bentoníticos en pilas.⁴⁵

1.9.1.3 Desarenador.

Los lodos bentoníticos se suelen contaminar frecuentemente de arena y limos que se van acumulando a medida que se avanza en la excavación. Es por eso que se deben tener un proceso de desarenado para que estos puedan cumplir con los requerimientos establecidos anteriormente.

Estos lodos se bombean al desarenador tipo SOTRES, como el que se muestra en la *Ilustración 39*.

El desarenador se encuentra fuera del perímetro de excavación, de modo que sea accesible para cualquier ubicación del predio.¹⁸

⁴⁵ European Standard. (2010). NF EN 1536 Pilas. AFNOR. Francia



Ilustración 39 Desarenador de lodos bentoníticos.⁷

1.9.2 Concreto.

1.9.2.1 Pruebas de control de calidad para el concreto fresco.

El concreto debe seguir un control estricto de calidad en proyectos de esta magnitud. Como se mencionó anteriormente en la descripción del proyecto, en el caso del 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^2 .

El módulo de elasticidad del concreto para el muro Milán será de $280,000 \text{ kg/cm}^2$. Un aspecto muy importante con el que un concreto debe cumplir es la trabajabilidad. Aun cuando no exista un procedimiento de ensaye que la mida directamente, existen algunos que proporcionan información útil, uno de los más conocidos es el revenimiento.

Prueba de revenimiento.

Es la medida de consistencia de concreto fresco en términos de la disminución de altura, en un tiempo determinado, de un cono truncado de concreto fresco de dimensiones específicas. Para el desarrollo de esta prueba es necesario: un balde metálico, varilla de acero de sección circular, recta lisa de 16 mm. de diámetro aproximadamente 600 mm. de longitud, con uno de los extremos redondeados hemisféricamente con un radio - de 8 mm. Equipo de cribado (malla 38 mm), y herramienta manual, como palas, cucharas, llanas metálicas y guantes de hule.¹⁸

De acuerdo a las normas .NF EN 1538, el revenimiento que debe presentarse al vaciar el concreto es de 200 mm +/- 30. En el caso de Muros Milán. La Tabla 14 muestra el revenimiento necesario en el Muro Milán en diferentes casos.

Flow diameter Ø (mm)	Slump H (mm)	Typical conditions of use (examples)
500 +/- 30	150 +/- 30	- concrete placed in dry conditions
600 +/- 30	200 +/- 30	- concrete placed by tremie pipe in submerged conditions under support fluid

TABLA 14 Revenimiento para el concreto utilizado en Muro Milán.²⁰

En el caso de los barrettes el revenimiento propuesto de acuerdo a la norma NF EN 1536 es de acuerdo a la siguiente tabla, en la cual es igual que en el muro Milán. Se puede apreciar en la *Tabla 15*.

Flow diameter Ø (mm)	Slump H (mm)	Typical conditions of use (examples)
500 +/- 30	150 +/- 30	- concrete placed in dry conditions
560 +/- 30	180 +/- 30	- placed by pumping or - concrete placed by tremie pipe in submerged conditions under water
600 +/- 30	200 +/- 30	- concrete placed by tremie pipe in submerged conditions under a support fluid
NOTE The measured slump (H) or flow diameter (Ø) should be rounded off to the nearest 10 mm.		

TABLA 15 Revenimiento para el concreto utilizado en pilas.⁴⁵

En la Tabla 16 que se muestra a continuación se puede ver las normas donde se regula este procedimiento:

Prueba	Norma	
Peso volumétrico	NOM-C-162	15 kg/m ³
Contenido de aire en % del volumen del concreto-	NOM-C-157	1%
Revenimiento	NOM-C-156-1980	1.5-3.5 cm
Contenido de agregado grueso retenido en la criba 1.7		6%
Promedio de la resistencia a la compresión a 7 días de edad de cada muestra		7.5%

*TABLA 16 Pruebas al concreto y su normatividad correspondiente.*¹⁸

Las dos muestras para efectuar las determinaciones de esta tabla deben obtenerse de dos porciones diferentes tomadas al principio y al final de una descarga.

El ensaye que con mayor frecuencia se realiza en las obras, es la determinación rutinaria de la consistencia del concreto mediante la prueba de revenimiento, esto es debido principalmente a su facilidad y al hecho de que se obtienen resultados inmediatos. La variación en el revenimiento es con frecuencia un medio para detectar variaciones en la relación agua-cemento.¹⁸

1.9.2.2 Pruebas en concreto endurecido.

Las pruebas para el concreto endurecido se realizan en laboratorios especializados en materiales. Las principales propiedades y características del concreto endurecido, son las siguientes:

- Resistencia a la Compresión Simple
- Resistencia a la Tensión.
- Resistencia a la Flexión.
- Resistencia al Esfuerzo Cortante.
- Resistencia a la Compresión Triaxial.
- Resistencia a la Torsión.
- Resistencia al Impacto.
- Resistencia a la Fatiga.
- Resistencia al Intemperismo.

De éstas la resistencia del concreto en compresión, se considera como su propiedad más importante, sin embargo, en algunos casos especiales, otras propiedades, tales como impermeabilidad, durabilidad, conductividad térmica, etc., pueden resultar más valiosas. Además, muchas de las características deseables del concreto, aunque no todas, se relacionan cualitativamente con su resistencia a la compresión.

Los cilindros para pruebas de aceptación deben tener un tamaño de 6 x 12 pulgadas (150 x 300 mm) o 4 x 8 pulgadas (100 x 200 mm), cuando así se especifique. El diámetro del cilindro utilizado debe ser como mínimo tres veces el tamaño máximo nominal del agregado grueso que se emplee en el concreto. La resistencia del concreto se calcula dividiendo la máxima carga soportada por la probeta para producir la fractura entre el área promedio de la sección.

ASTM C 39 presenta los factores de corrección en caso de que la razón longitud diámetro del cilindro se halle entre 1.75 y 1.00, lo cual es poco común. Se someten a prueba por lo menos dos cilindros de la misma edad y se reporta la resistencia promedio como el resultado de la prueba, al intervalo más próximo de 0.1 MPa.¹⁸

1.9.3 Acero de refuerzo.

El acero de refuerzo debe satisfacer los requisitos de calidad establecidos en la Norma Oficial Mexicana NOM-B-6-1998.

“ASTM A 615M-96 “Standard Specification for deformed and plain billet-steel bars for concrete reinforcement” es la normatividad que regula las varillas corrugadas y lisas de acero para cumplir con las características físicas y químicas establecidas en la Tabla 17.

Norma	Descripción
NOM-B-1979	Métodos de análisis para determinar la composición de aceros y fundiciones.
NOM-B-6-1988	Varillas corrugadas y lisas de acero procedentes de lingote
NOM-B-78	Métodos de análisis fotométricos para determinar la composición química de aceros y fundiciones.
NOM-B-113	Prueba de doblado para productos de acero.
NOM-B-310-1981	Métodos de prueba a tensión para productos de acero.
ASTM A615 M96a	Standard specifications for deformed and plain billet-steel bars for concrete reinforcement.

TABLA 17 Normatividad del control de calidad de acero.²⁶

El acero de refuerzo debe estar sometido a diversas pruebas de control de calidad para que sea eficiente. Esto aplica a varillas corrugadas, mallas electrosoldadas, entre otros elementos.

Existen otras alternativas como refuerzo tales como perfiles de acero, sin embargo, se debe tener cuidado de no utilizar acero galvanizado, ya que causan efectos electrostáticos que afectan la estabilidad del lodo.

Prueba de tensión de acero

La norma N-CMT-2-03-001/07, la cual contiene requisitos de calidad de acero de refuerzo proveniente del lingote, que se utilice en estructuras de concreto hidráulico.

La designación de esta prueba se encuentra en la M-MMP-2-03-002. Esta prueba consiste en someter un material a tensión hasta que se produce la falla en el elemento. La prueba nos permite saber la resistencia de un material cuando la fuerza es aplicada lentamente.

La resistencia a la tensión de las varillas de acero debe cumplir con la Tabla 18:

Características	Grado 30 MN/m ²	Grado 42 MN/m ²	Grado 52 MN/m ²	Grado 42 baja aleación. MN/m ²
Límite de fluencia mínimo	300	412	510	412
Límite de Fluencia máximo	-----	-----	-----	540
Resistencia a la tensión mínima.	500	618	706	550

*Tabla 18 Resistencia a la tensión de las varillas de acero.*²⁶

Prueba de doblado de varilla.

Las varillas de acero deben cumplir con esta prueba mencionada en el Manual M-MMP-2-03-003 Resistencia al Doblado de productos metálicos. En esta prueba consiste en doblar 90° y 180° una probeta de varilla y analizar en la parte exterior de la zona doblado.²⁶

Inspección metalúrgica macroscópica.

Otro aspecto relevante en el control de calidad de las varillas es realizar una inspección para revisar si hay grietas de enfriamiento, defectos superficiales, inclusión de materia contaminante

Prueba de ultra sonido en acero.

Se caracteriza por un ser un procedimiento no destructivo, que consiste en medir la densidad del material de acuerdo con la velocidad de propagación del sonido. Esto permite detectar discontinuidades superficiales e internas de un elemento de acero. Esta prueba es necesaria para medir el control de calidad de perfiles de acero y varillas.²⁶

2 Descripción del proyecto University Tower.

University Tower es un proyecto innovador, que engloba retos en la ingeniería que buscan que la construcción tenga una mejor eficiencia estructural y constructiva. Dicho proyecto se aprecia en la *Ilustración 40*.

El proyecto que se planea realizar, es la construcción de un edificio de oficinas de 58 niveles. Cuenta además de 17.5 sótanos de estacionamiento. Se encuentra en Av. Paseo de la Reforma #150, esquina con Lucerna y Viena en la Col. Juárez en la Ciudad de México (*Ilustración 41*). Dotándolo de una ubicación privilegiada en el centro de la Ciudad de México. Dicho complejo formará parte del University Club.

En esta sección se analizará el desarrollo y construcción de la cimentación. Se diseñó una cimentación mixta, buscando que sea compensada y a través de pilas o barretes.



Ilustración 40 . University Club ⁴⁶

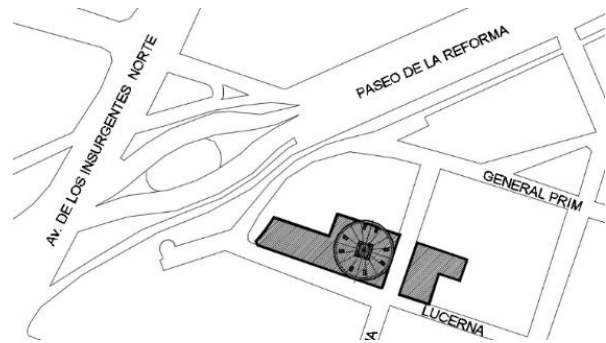


Ilustración 41 Ubicación del predio. ⁴⁷

46 Del parque (2016) University Tower. [citado el 2019-03-19] Disponible en: <https://universitytower.mx/>

47 CIM-ING-UNT-PLA01 "Trazo de Brocales de muro Milán y Barrettes"

Uno de los mayores retos en la construcción de la subestructura, es buscar una propuesta óptima para la estabilización de la excavación de la lumbrera, además de una propuesta para la cimentación que cumpla con los estados límites de esfuerzo de falla y de servicio.⁴⁸

2.2 Estratigrafía del sitio y condiciones piezométricas.

La lumbrera tiene una profundidad de -46.65, con lo cual se genera un volumen de material producto de la excavación de aproximadamente 47 000 m³, los cuales serán equivalentes a un peso de 68, 761 toneladas. Dicho elemento estará desplantado en los depósitos profundos, en donde existe una serie de arenas y gravas aluviales cementadas por arcillas duras y carbonatos.

Se realizaron diversos sondeos en la zona y se encontró el nivel freático a una profundidad de 2.81 m, en la costra superficial.

El máximo esfuerzo horizontal al cual serán sometidas las paredes de la lumbrera será de 57.09 ton/m² en fondo de la excavación.

|

Las pilas o barrettes que se construirán desplantadas a una profundidad de 75 metros, en un estrato donde se encuentran depósitos aluviales. Estas estructuras atravesarán estratos de series arcillosas de diferentes resistencias, permitiendo que la pila trabaje por fricción y por punta. Este hecho se analizará más adelante.

El proyecto University Tower, se encuentra en la Zona III b, en la Zona del Lago. A continuación, en la Tabla 19 y en la Tabla 20, se expondrá la estratigrafía y propiedades del sitio de la cimentación explicadas a detalle como el peso volumétrico φ . la cohesión c , el ángulo de fricción interna del suelo ϕ .

Para la excavación de la lumbrera se instalará un sistema de bombeo para abatir el manto freático en el interior, este estará formado por pozos

48 CIMESA (2019) "Edificio de Departamentos University Tower. Memoria de Cálculo Estructural de Muro de Contención con Milán y Cimentación.". México.

profundos. Los pozos serán de sección circular de 6" de diámetro y llegarán hasta los 47.5 m de profundidad.

En la *Ilustración 42* se puede ver una comparación entre la presión de poro y la presión hidrostática original, mientras que en la *Ilustración 43*, se analizan la distribución de presiones hidráulica normales y extraordinarias, y finalmente en las dos ilustraciones se obtienen los esfuerzos verticales y empujes verticales en la *Ilustración 44*.⁴⁸

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 Nspt=25
U7a	-61.00	-64.50	Serie Arcillosa profunda, tiene un numero de golpes Nspt=95
U7b	-64.50	-67.00	Serie Arcillosa profunda, tiene un numero de golpes Nspt=30
U7c	-67.00	-68.00	Serie Arcillosa profunda, tiene un numero de golpes Nspt=100
U7d	-68.00	-71.00	Serie Arcillosa profunda, tiene un numero de golpes Nspt=25
U8	-71.00	-75.15	Deposito Aluviales profundos, tiene un numero de golpes Nspt>25

TABLA 19 Secuencia estratigráfica.⁴⁸

Unidad	Prof. i (m)	Prof. f (m)	Descripción	γ (t/m ³)	C (t/m ²)	ϕ °
U1	0.00	-5.00	Relleno Artificial y Costra superficial	1.50	3.00	20
U2	-5.00	-20.00	Serie Arcillosa Superior 1. Arcillas de alta plasticidad.	1.30	2.00	0
U3	-20.00	-30.00	Serie Arcillosa Superior 2. Arcillas y Limos de alta plasticidad.	1.30	3.50	5
U4	-30.00	-34.00	Capa Dura. Limos arenosos con arcilla y gravas.	1.70	3.00	35
U5	-34.00	-40.00	Serie Arcillosa Inferior 1. Estratos de Arcilla separados por lentes duros.	1.35	6.00	25
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
U7	-58.00	-61.00	Serie Arcillosa profunda, tiene un numero de golpes N _{spt} =25	1.70	25.00	0
U7a	-61.00	-64.50	Serie Arcillosa profunda, tiene un numero de golpes N _{spt} =95	1.75	8.00	32
U7b	-64.50	-67.00	Serie Arcillosa profunda, tiene un numero de golpes N _{spt} =30	1.70	25.00	0
U7c	-67.00	-68.00	Serie Arcillosa profunda, tiene un numero de golpes N _{spt} =100	1.75	8.00	32
U7d	-68.00	-71.00	Serie Arcillosa profunda, tiene un numero de golpes N _{spt} =25	1.70	25.00	0
U8	-71.00	-75.15	Deposito Aluviales profundos, tiene un numero de golpes N _{spt} >25	1.75	25.00	38

TABLA 20 Propiedades del subsuelo.⁴⁸

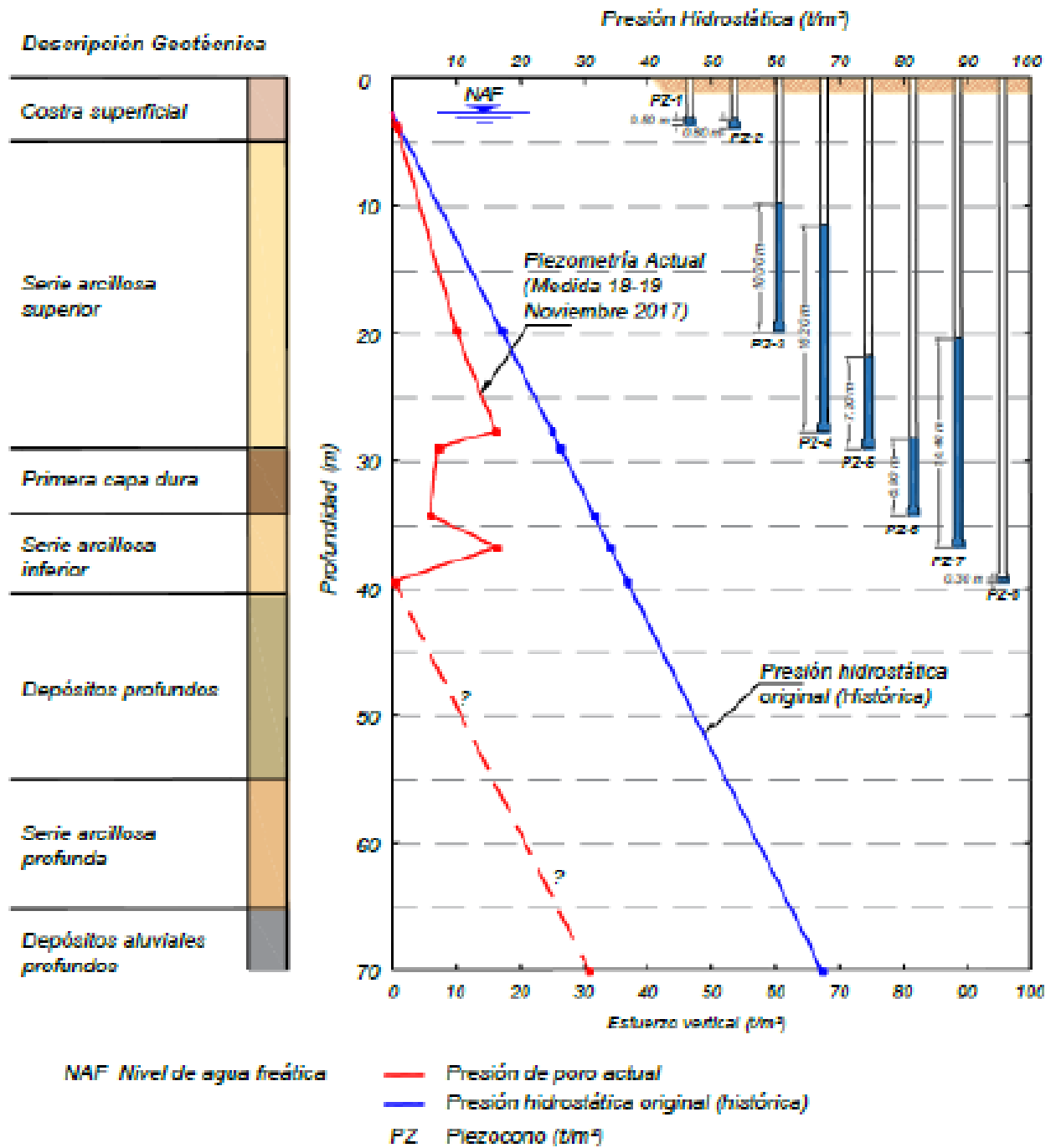


Ilustración 42 Distribución de presiones en el sitio.⁴⁸

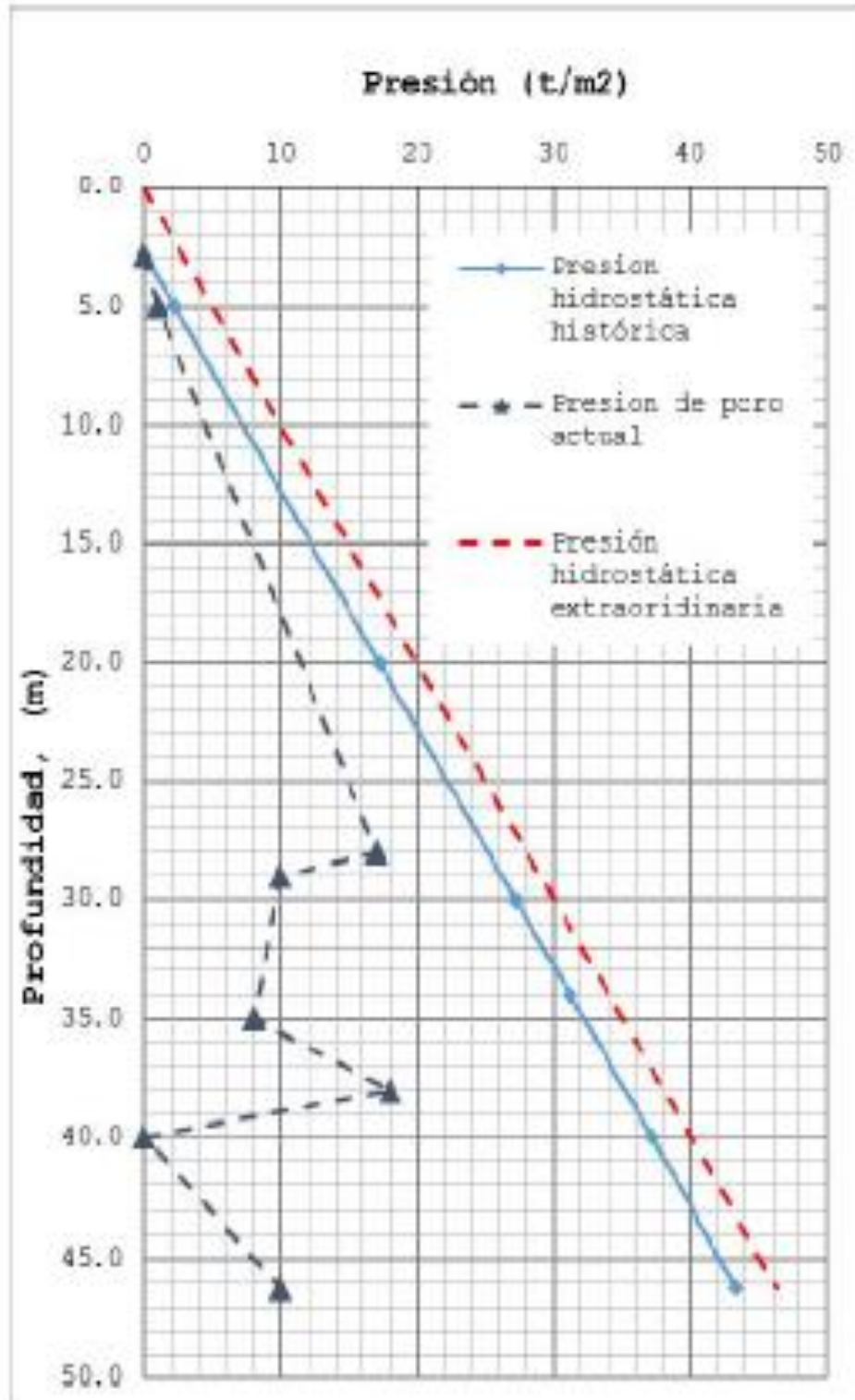


Ilustración 43 Distribución de presiones hidráulicas normales y extraordinarias.⁴⁸

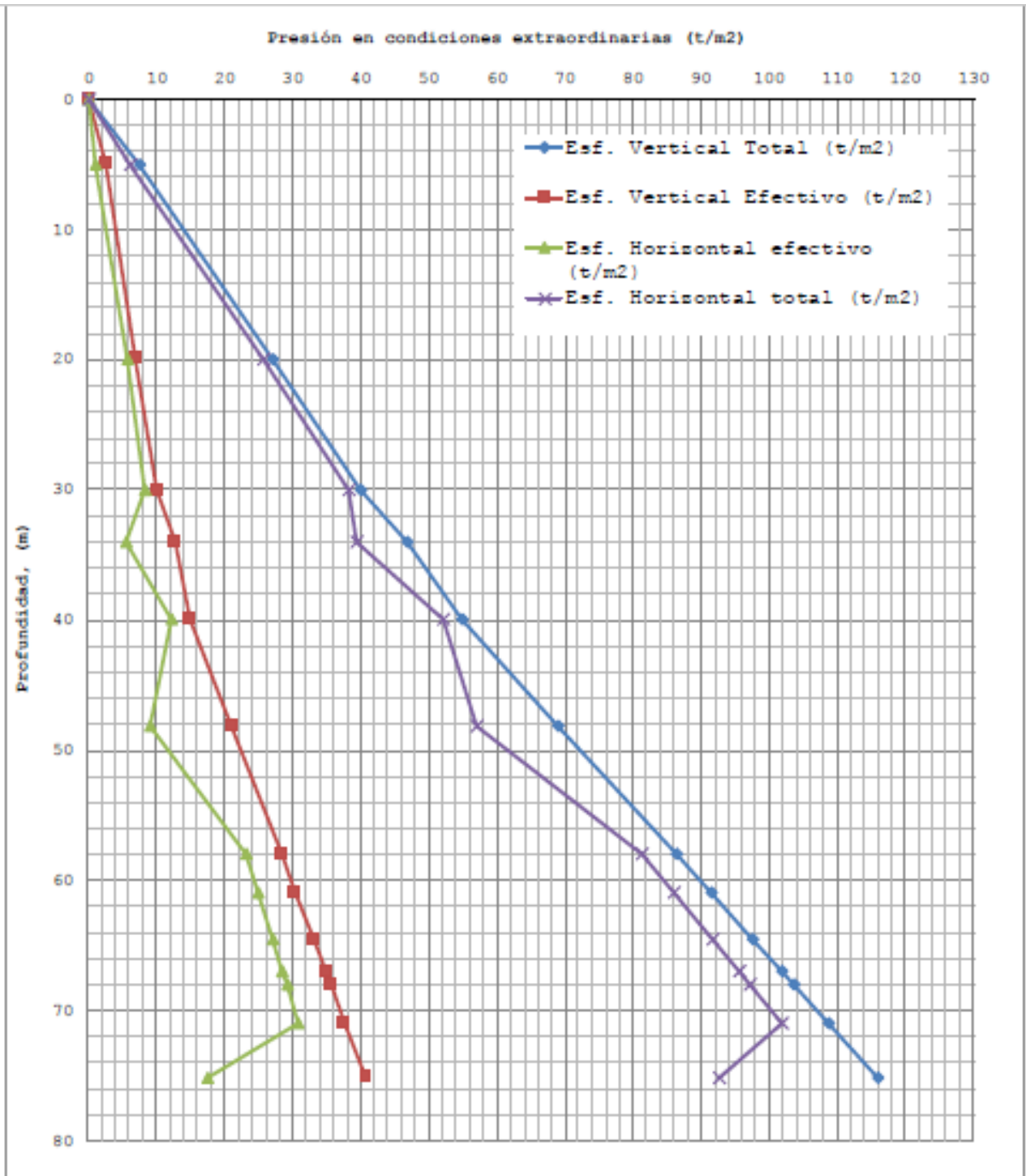


Ilustración 44 Distribución de esfuerzos verticales y empujes horizontales.⁴⁸

2.3 Descripción de la subestructura.

La subestructura de la torre consiste en una lumbrera de concreto reforzado, construida a partir de paneles de muro Milán y barretes, La subestructura se aprecia en la Ilustración 45.

La propuesta de estabilización para alcanzar el nivel máximo de excavación como se ha mencionado anteriormente se propone realizarse mediante muros Milán de 100 cm de espesor.

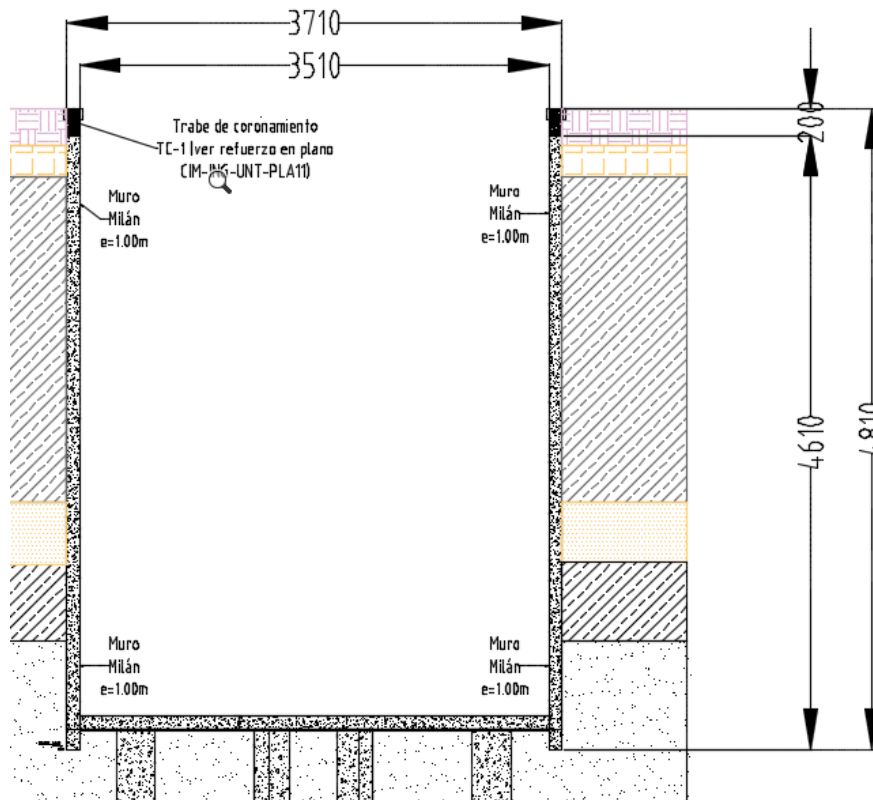


Ilustración 45 Dimensiones de la subestructura. Corte Transversal A-A⁴⁹

El diámetro es de 35.10 m en el interior. El muro tiene un nivel de desplante de 48.10 m de profundidad, construido 1.45 m por debajo del nivel máximo de excavación, situando a la losa de fondo a 46.65 m.

49 CIM-ING-UNT-PLA03 Corte transversal A-A”

La propuesta de cimentación será construir barretes de tipo mixto, es decir que trabajen por fricción y por punta, estas pilas o barretes se encontraran distribuidas en el centro y de forma radial.⁴⁸

Los barretes tendrán un nivel de desplante a una profundidad de 75 m, acotados por la losa de fondo. Las dimensiones de dichas estructuras se muestran a continuación de la *Ilustración 46 a la 49*.

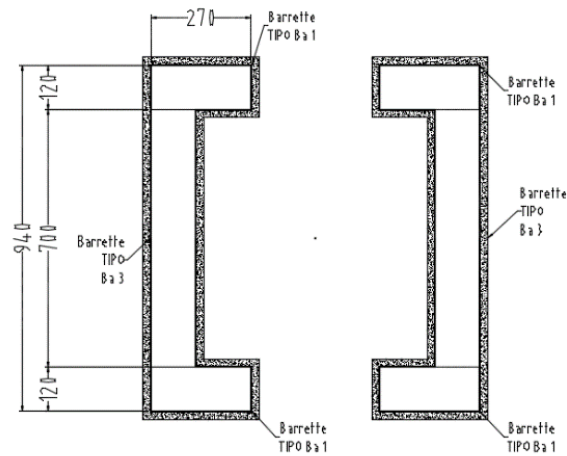


Ilustración 46 Barretes centrales.⁴⁷

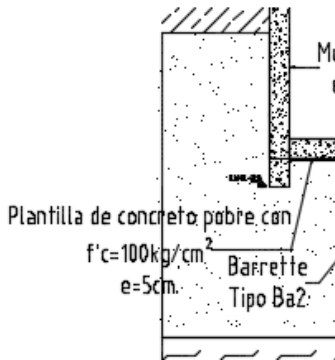


Ilustración 47 Vista en planta. Barrete radial.⁴⁷

Ilustración 48 Detalle de la Losa de Fondo.⁴⁷

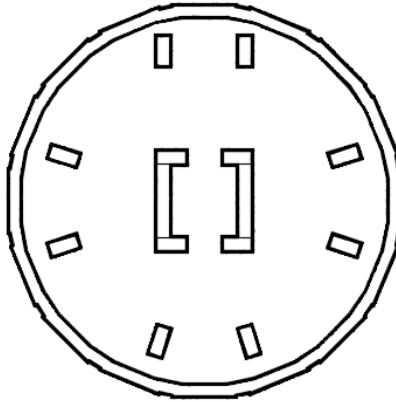


Ilustración 49 Distribución de Barretes.⁴⁷

Ventajas del uso de una lumbrera como cimentación

La geometría del muro permite una distribución de cargas uniforme en toda la superficie, evitando deformaciones en el muro. Este hecho hace la subestructura estable, tal como lo menciona en la memoria de cálculo del muro Milán:

“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.”

Se pudo haber considerado una cimentación con la forma del predio, aplicando un sistema de apuntamiento o anclaje. Sin embargo, por las características del suelo con depósitos arcillosos que se presentan en el terreno, no es posible considerar anclaje. El anclaje por ser éste un material “blando”, serían de baja a mediana capacidad y el barreno o dispositivo de anclaje es común que se ensanche en su parte final. Estos elementos hacen este sistema costoso y poco eficiente. Otro factor determinante para seleccionar esta geometría es la facilidad de construcción de una lumbrera con Muros Milán.⁴⁸

Tolerancias

Es de vital importancia que la tolerancia sea de 0.4% máximo por su forma circular y en el diseño se calculó con una desviación más crítica de 0.8%, de lo contrario puede que no se alcance el efecto diseñado en el proyecto.

De acuerdo a la memoria de cálculo del proyecto se diseñan de acuerdo a dos casos, el óptimo el cual asume que no se exceden las tolerancias y que las superficies entre cada panel tengan un espesor efectivo, es decir que se empalme con el panel contiguo de 1 m. En el otro caso y el más negativo es que todos los paneles tengan una desviación máxima llegando a un espesor de 0.58 m. Esto se puede comprobar en la Ilustración 50 y 51.⁴⁸

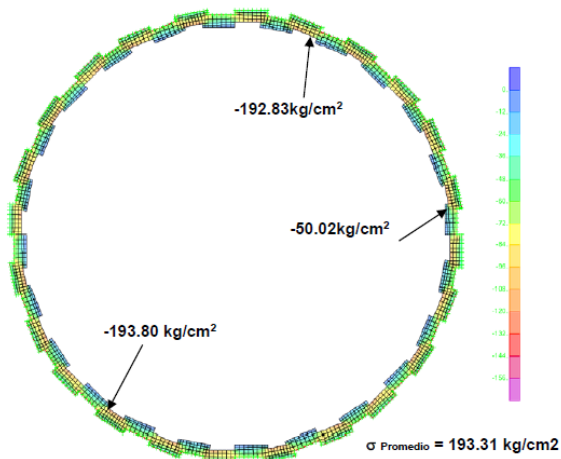


Ilustración 50 Caso críticos y desfavorable.⁴⁸

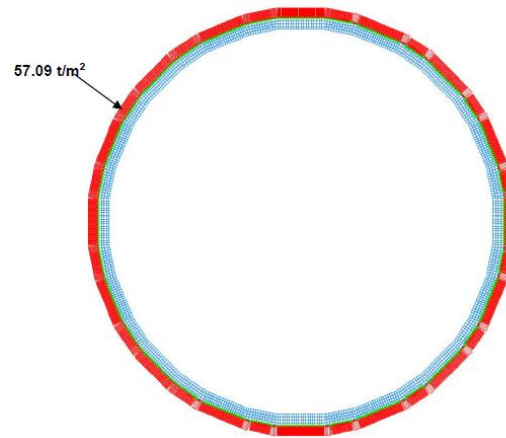


Ilustración 51 Mejor de los escenarios.⁴⁸

3 Proceso Constructivo de la subestructura.

El proceso constructivo, como se detalló anteriormente, abarcará la construcción de la subestructura de la torre es decir la lumbrera, los barretes y la losa de fondo. De acuerdo con el proceso constructivo descrito en la “Memoria de Cálculo Estructural del Muro de Contención Milán y de Cimentación profunda”, de forma general se debe seguir la siguiente secuencia general para garantizar su estabilidad:

1. Trazo y construcción de brocales para el muro Milán y Barretes de concreto reforzado.
2. Construcción de muro Milán de 1.0 m de espesor desplantado a los -48.10 m de profundidad. El perímetro es de 123.63 m conformados por 16 paneles de longitudes iguales.
Usando lodos bentoníticos para estabilizar la zanja. Estos lodos jugarán un papel muy importante en este concepto.
3. Instalación del sistema de bombeo dentro de la lumbrera para abatir el manto freático, al mismo tiempo que se construye el muro Milán. Estos serán cuatro, uno en cada cuadrante.
4. Construcción de la trabe de coronamiento y ménsulas que permitan soportar la estructura del edificio.
5. Excavación del núcleo, a una profundidad de 46.65 m.
6. Colocar un firme de concreto en el fondo de 5 cm de espesor.
7. Construir la losa de fondo.⁴⁸

3.1 Materiales.

Los materiales más usados son el concreto y el acero, los cuales se utilizan en elementos tales como muro Milán, barretes y losa de fondo.

En los paneles del muro Milán se utilizó concreto Clase 1 con una resistencia a la compresión simple de $f'c = 400 \text{ kg/cm}^2$, y un módulo de elasticidad de $280,000 \text{ kg/cm}^2$. El acero de refuerzo que integrarán los paneles tienen un f_y de $4,200 \text{ kg/cm}^2$

En el caso de los barretes y la losa de fondo, son de un concreto más resistente de 350 kg/cm^2 , con un módulo de elasticidad igual a $261,916$

kg/cm². El acero de refuerzo que tienen los barretes es de un fy de 5, 600 kg/cm².⁴⁸

Para la trabe de coronamiento, se utilizó concreto simple con f'c de 450 kg/cm² y módulo de elasticidad 296, 985 kg/cm².

Además de estos materiales, los cuales son considerados los principales, se utilizó bentonita para la elaboración de lodos. También en mucho menor proporción resinas para los anclajes de las ménsulas y materiales para juntas entre paneles y trabe de coronamiento. A su vez se incluyen materiales de obras temporales como los usados en las plataformas para la excavación del núcleo como perfiles de acero y losa acero, cementantes como relleno fluido, grout entre otros. Dichos materiales se explicarán a detalle más adelante

3.2 Preliminares

Los trabajos previos en la construcción de una obra son una fase inicial para poder desarrollar el proyecto. Estos conceptos involucran:

- Limpieza del terreno.
- Trazo y nivelación, delimitación del área de la obra y preparación del terreno.
- Colocación de instalaciones provisionales.

3.2.1 Limpieza del terreno

La limpieza del terreno se hizo para preparar el lugar donde se va a construir, quitando todos los obstáculos que puedan impedir el desarrollo de la obra.

En esta etapa fue cuando se llevó a cabo la demolición el Salón de Eventos del University Club. También, se removió la carpeta asfáltica de lo que era el estacionamiento trasero del edificio. De la misma forma se retiraron las bardas perimetrales y una cisterna.

Como el área de la cimentación excedía el tamaño del predio, fue necesario demoler el segmento de la banqueta de la Calle Lucerna y Viena que

correspondía a la obra y un tramo de la carpeta asfáltica. Se puede ver una vista aérea de la zona en la *Ilustración 52*, en donde se ve el área antes de la empezar la construcción.

En la *Ilustración 53*, se expone el interior del Salón de Fiestas, posteriormente esta será la zona demolida. En la *Ilustración 54* se muestra el exterior del edificio en el estacionamiento, y en la *Ilustración 55* el predio ya con la obra en curso.

En el predio adyacente a la construcción, se encontraba un estacionamiento, el cual se habilitó para funcionar como oficinas de la misma obra. En esta zona también se le retiró la carpeta asfáltica y se colocaron los contenedores de bentonita, el almacén y maquinaria pesada.



Ilustración 52 Vista Área del University Club.⁵⁰



Ilustración 53 Salón de Eventos.⁵⁰



Ilustración 54 Sitio de la construcción antes de la limpieza del terreno.⁵⁰



Ilustración 55 Sitio de construcción en proceso.⁷

3.2.2 Trazo y nivelación

⁵⁰ Google Maps. Ubicación de University Tower. [citado el 2019-05-19] Disponible en: <https://www.google.com.mx/map>

En esta parte del proceso preliminar, fue necesario delimitar las áreas que se usaron para la construcción y definir el área de la construcción, es por eso que se emplearon tapiales (*Ilustración 56*) en el perímetro de la obra. De esta manera se evitan accidentes a terceros. También se colocaron vallas metálicas que delimiten el área para que los transeúntes atravesaran la calle a lo largo de Lucerna y Viena.



Ilustración 56 Paso de transeúntes en el cruce de Viena y Lucerna.⁷

En el esquema que se muestra a continuación (*Ilustración 57*), se aprecia una comparación del límite que tenía el predio antes de la excavación y el perímetro de la construcción cubierto para abarcar toda la lumbrera.

Para tener una plataforma estable en donde pueda circular maquinaria y se puedan realizar otros procedimientos, fue necesario colocar un firme de concreto en toda el área. Esta plataforma debe ser estable, debe estar arriba del NAF, completamente horizontal, tener accesos sin obstáculos, no debe haber obstrucciones y debe estar compactada.

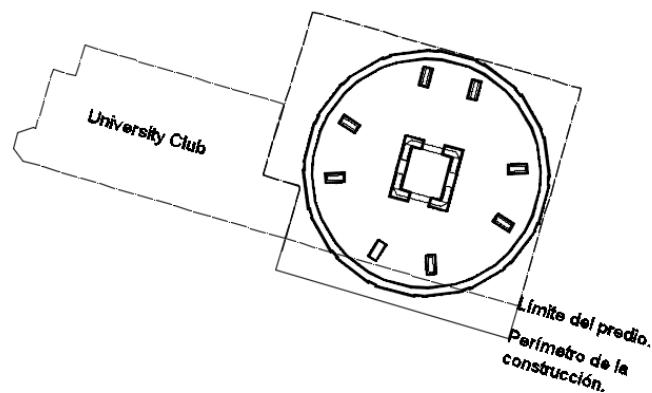


Ilustración 57 Comparación perímetro de construcción con el del predio.⁴⁷

En esta etapa se trazan la sección transversal de la lumbrera y los barretes, definiendo así las dimensiones de cada elemento.

3.2.3 Colocación de instalación provisionales

Predio Adyacente

En las oficinas colocadas en este predio, se incluyeron un comedor para los trabajadores y dos espacios para la administración de obra. En este sitio también se instalaron servicios sanitarios portátiles y bodegas.

Es importante destacar que se colocó el sistema de producción de lodos bentoníticos (*Ilustración 58*). Se instalaron contenedores de lodos bentoníticos, una tolva y un sistema de transporte de tuberías conectado al predio de la construcción cuando debía de emplearse.

También se tomó en cuenta la instalación de una planta generadora de energía que permitiera abastecer de forma adecuada cuando se necesite.



Ilustración 58 Silos donde se almacenan lodos bentoníticos en el predio adyacente .⁷

Sitio de la Obra

Se instalaron tuberías alrededor del predio para poder suministrar de lodos bentoníticos a donde al panel lo requiriera y de ahí al desarenador para asegurar su calidad.

Se colocaron también instalaciones eléctricas para hacer visibles los trabajos en los turnos nocturnos, por ejemplo, cuando se realizaba el vaciado del concreto de los paneles.

Otra instalación muy importante para el desarrollo de la obra, fue la colocación de tuberías alrededor del predio para proporcionar de agua en todo momento, para retirar lodos bentoníticos de la superficie cuando se derramaban al introducir la almeja hidráulica y también en el caso de accidentes.

Se colocaron almacenes de materiales, instalaciones (*Ilustración 59*) y bodegas de residuos peligrosos, cuya ubicación depende de la logística que se esté llevando a cabo en la obra.



Ilustración 59 Almacén de la obra e instalaciones.⁷

3.3 Muros Milán de la lumbrera.

El muro es desplantado a 48.10 m de profundidad, con una desviación máxima con la vertical del 0.4%. La lumbrera está sometida a 189.7 1 ton/m.

De acuerdo a la memoria de cálculo del proyecto para este elemento se estableció la siguiente secuencia:

1. Construcción del muro Milán circular
2. Excavación a -2.0 m de profundidad dentro del área de la lumbrera, con abatimiento del nivel freático en el interior a 5 m.
3. Construcción de la trabe perimetral de coronamiento de 100 cm de base por 200 cm de peralte en toda la lumbrera, además de incluir ménsulas que funcionen como soportes a las columnas de la estructura superior de la torre.
4. Excavación hasta el Nivel máximo de excavación (NME) de -46.65 m en toda la lumbrera, con abatimiento del agua en el interior de la lumbrera a -47.50 m de profundidad.
5. Construcción de losa de fondo de 1.00 m de espesor. ⁴⁷

Para realizar el primer punto, la construcción del muro Milán circular englobó el siguiente procedimiento:

1.- Primero se excavó una zanja guía, construyendo brocales. Estos últimos elementos cumplen como revestimiento y protegen la zanja al introducir la almeja hidráulica cuando se realiza la perforación. A medida que se avanza en la construcción de paneles se constituyen los brocales.

2.-La excavación de los paneles se hizo por entrepaños. Cada panel mide 7.42 m, introduciendo lodos bentoníticos para estabilizar las paredes de la excavación. Posteriormente se colocaron juntas de tipo CWS, la cual se explicará más adelante en los extremos de los paneles.

3. Se colocaron tres jaulas que conforman el acero de refuerzo en cada panel en el lugar dejando un espacio de 60 cm concreto simple entre estas.

4.- A través del sistema Tremie se realizó el colado del panel, el cual consiste en vaciar el concreto fresco desde el fondo, de esta manera se va el concreto fresco va ocupando el volumen de la excavación desplazando el lodo.

3.3.1 Brocales

Como se mencionó anteriormente, el primer paso fue construir una zanja guía, instalando brocales (Ilustración 60) para dar estabilidad. Dicho elemento, es una ranura en la superficie del terreno. Para el caso del proyecto University Tower, el grosor de los brocales fue de 0.20 m, la profundidad de la zanja guía es de 1.4 m, considerando el espesor del muro de 1 m y de los brocales de concreto reforzado más la tolerancia que permita el paso de la almeja de excavación. El brocal tendrá un peralte de 0.8 m.

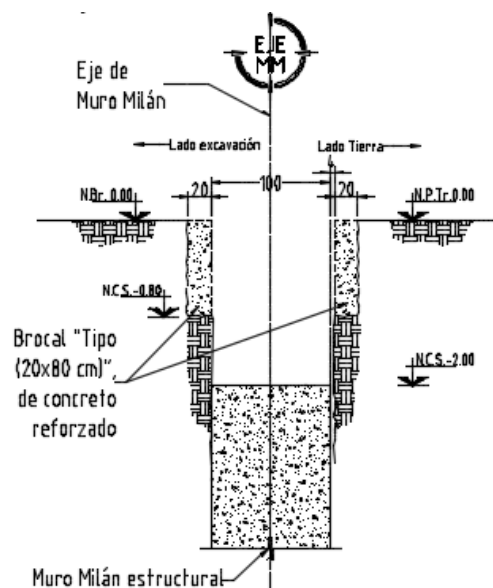


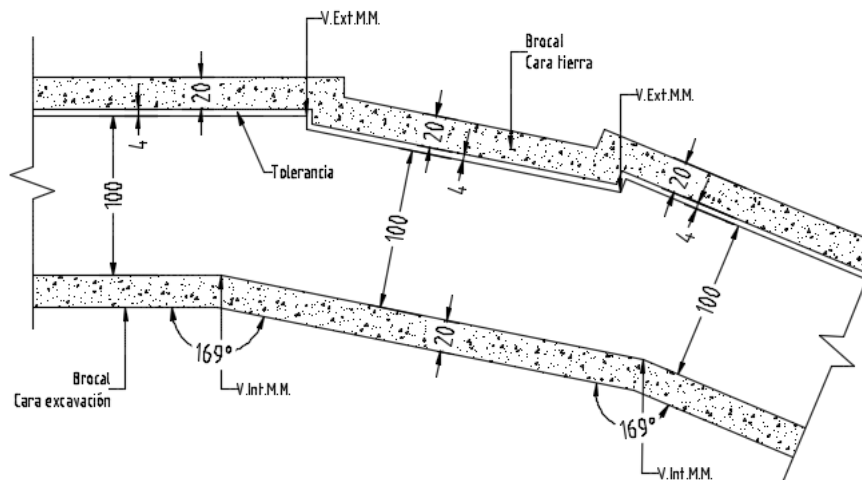
Ilustración 60 Brocal para Muro Milán.⁴⁷

Las funciones que tuvieron los brocales son:

- Precisar la posición topográfica de los muros incluyendo los ángulos y las curvas necesarias.
- Controlar la operación de excavación guiando a la almeja entre en la posición correcta.

- Estabilizar la parte superior de la excavación y evitar caídos locales.
- Confinar el lodo y facilitar el control de su nivel durante la excavación.
- Facilitar la colocación de la junta y en caso necesario servir de apoyo para sostenerla.
- Soportar la jaula del acero de refuerzo en posición fija para evitar que penetre o se levante.
- En caso necesario servir de apoyo al paso de la maquinaria pesada de excavación y maniobra.

En la *Ilustración 61* se muestran un esquema, exponiendo las dimensiones de los brocales y el espesor del muro.



*Ilustración 61 Brocal de Muro Milán. Vista en planta.*⁴⁷

La zanja se excavó con una excavadora CAT 312 ligera y en caso de tropezar con instalaciones se procedía manualmente. De acuerdo a la memoria de cálculo mencionada anteriormente el procedimiento para construir brocales es:

- Trazo y excavación.
- Colocación de malla electrosoldada como armado.
- Colocación de cimbra y colado.
- La cimbra se remueve una vez que el brocal y se puede auto sostener.

En la *Ilustración 62* se muestra la zanja excavada con los brocales contruidos, previo a la perforación.



Ilustración 62 Vista de zanja, previo a la colocación de acero de refuerzo.⁷

3.3.2 Excavación de paneles de Muro Milán

La maquinaria que se ocupó, fue una Almeja hidráulica semiguída modelo Liebherr HS 855, cuya abertura tiene dimensiones de 1 m x 2.70 m (Ilustración 63 y 64). Dicho modelo permite alinear la almeja al inicio de su caída para penetrar en la zanja con precisión y descender para excavar y extraer material rápidamente, sin que se desvíe. También este elemento le permitió rotar, lo cual facilitó hacer maniobras para este tipo de trabajos donde los paneles cambian de ángulo en cada punto del muro. Es importante considerar que a través de un software llamado SAKSO, es posible determinar la verticalidad de la excavación, de esta manera se tiene un control de calidad aceptable.



Ilustración 63 Almeja semiguada usada para excavar paneles.⁷

Esta perforación se estabilizó con ayuda de lodos bentoníticos, los cuales se van introduciendo a medida que se va excavando.

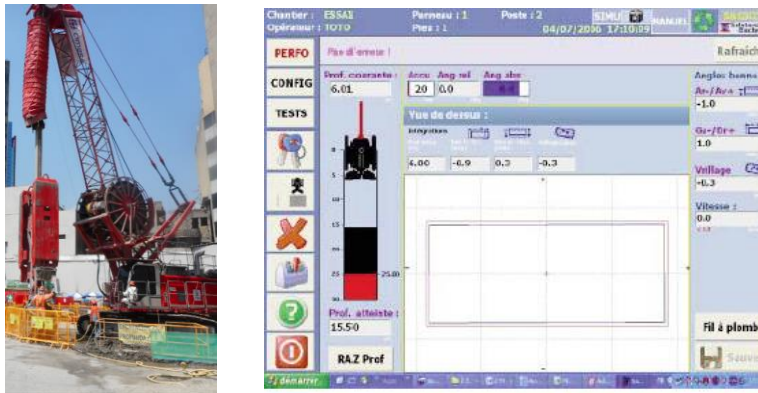


Ilustración 64 Almeja hidráulica semiguada y pantalla SAKS..^{7 19}

Secuencia de excavación

Para hablar de la secuencia, se deben clasificar los paneles en primarios, secundarios y mixtos. (Ilustración 65)

Los primarios son a los que se encuentran aislados, por tal razón se le colocan juntas CWS en los extremos con la banda Waterstop hacia el interior, la cual será explicada posteriormente. En cambio, los mixtos se encuentran contiguos a los primarios o a otro secundario, por lo tanto, solo se le colocan juntas CWS en un extremo solamente. Finalmente se tienen los secundarios o de cierre en donde simplemente se excavan y se aprovechan las juntas de los paneles contiguos preexistentes. Se puede ver en el esquema la representación de la clasificación de los paneles:

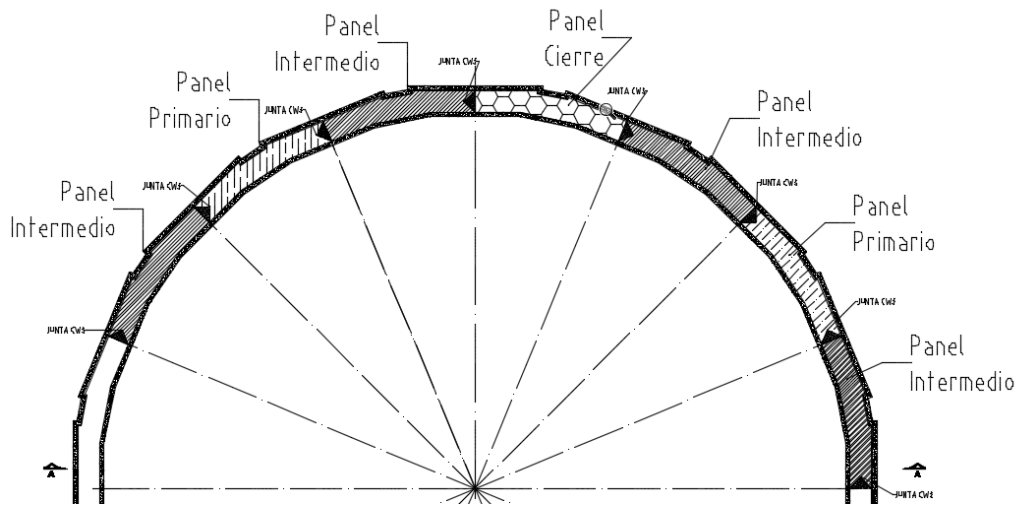


Ilustración 65 Tipos de paneles de excavación.⁴⁷

La secuencia de excavación de paneles debe ser planeada conforme a la facilidad de realización de maniobras, considerando las limitadas dimensiones del predio. De esta manera se construyen los paneles de los muros y se aprovecha recursos, como la maquinaria y la mano de obra el mayor tiempo posible.

Para darle la curvatura correspondiente del muro Milán, es necesario rotar aproximadamente 22° la almeja hidráulica. Para conformar un panel se hacen tres ciclos de excavaciones, se excava primero del lado izquierdo, después al derecho y finalmente en el centro al cual se llama “merlo”. A continuación, en la *Ilustración 66*, se pueden apreciar los tres diferentes giros que realizaba la almeja hidráulica para conformar un panel y en la *Ilustración 67* se puede ver en ejecución.

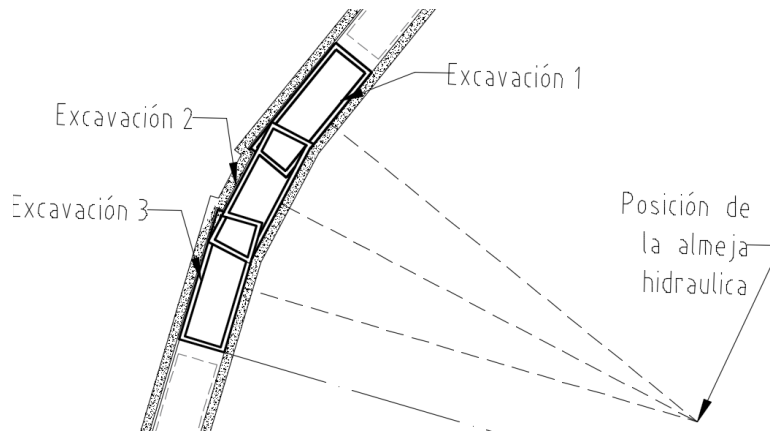


Ilustración 66 Vista en planta de los movimientos de la almeja hidráulica para excavar un panel.⁴⁷



Ilustración 67 Excavación de panel con almeja hidráulica semiguiada.⁷

Cuando la excavación en un panel se finaliza, es necesario limpiar el fondo de la zanja para eliminar la posible contaminación al concreto fresco. Esta limpieza se lleva a cabo extrayendo el lodo del fondo de la zanja para arrastrar el azolve depositado.

3.3.3 Aplicación de lodos bentoníticos.

A medida que se le excava con la almeja hidráulica, se suministran lodos bentoníticos producidos en el predio adyacente, los cuales son conducidos por un sistema de tuberías (*Ilustración 68*). Con estos fluidos como se menciona en capítulos anteriores permitieron darle estabilidad a la zanja, evitando desprendimientos en las paredes de la excavación.

Cuando se lleva a cabo el vaciado de concreto en los paneles, a medida que el concreto se suministra, el lodo bentonítico se extrae, llevándolo a la siguiente fase de desarenado. Esto se explicará más a detalle en el Subtema: Vaciado del concreto fresco.

Posteriormente el lodo bentonítico utilizado en estas excavaciones continuará su ciclo, trasladándose al desarenador, el cual removerá las partículas de arena que impiden que cumplan los estándares de calidad óptimos.

Como se describirá más adelante en el capítulo de Control de Calidad, fue necesario realizar pruebas en cada turno del lodo bentonítico que se está empleando.



Ilustración 68 Suministro de lodos bentoníticos a zanjas.⁷

3.3.4 Juntas CWS

Son elementos que tienen como función, confinar y moldear el concreto fresco cuando se realice el colado y formar un machimbrado entre los paneles, como la que se muestra en la *Ilustración 64*. Una junta debe cumplir con las siguientes propiedades:

- En obra va estar sometida a una gran carga de presión por la presencia lodos bentoníticos y concreto fresco, debe estar diseñada para resistir sin que exista la posibilidad de una deformación o una fuga lateral.
- Del otro lado de la junta donde se está excavando, esta protege al concreto del panel adyacente.

Debe haber una similitud con la forma de la junta y la de la almeja. En el caso del proyecto University Tower, son los bordes rectos.

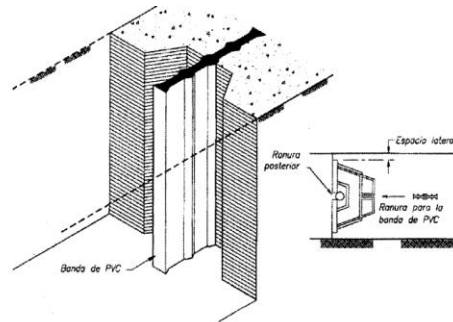


Ilustración 69 Banda de neopreno o waterstop.¹⁸

Para esta obra se utilizaron juntas CWS (*Ilustración 69 y 70*), las cuales son elementos metálicos, que forman un sistema de machimbrado. Se distinguen por contener una banda de neopreno “Water Stop” a lo largo de la junta que tienen la característica de resistir la acción de fuertes presiones de agua haciéndola hermética, absorber la expansión y contracción, movimientos laterales y transversales de la estructura.



Ilustración 70 Juntas CWS.⁷

En este caso este tipo de juntas, se ensamblan por tramos de junta de 3 m y se sumergen hasta completar la profundidad de la excavación requerida. Dicho sistema se coloca en los extremos de la zanja para posteriormente colocar acero de refuerzo y realizar el vaciado del concreto. Finalmente se puede moldear la hembra del machimbrado. El concreto cubrirá la banda de neopreno, por lo tanto, al quitar la junta esta podrá adherirse. Cuando se excave en el panel adyacente, el concreto vaciado cubrirá la sección del sobrante constituyendo un macho, cubriendo por completo la banda, como se puede ver en la *Ilustración 71, 72 y 73*. La distribución de las juntas se establece la *Ilustración 68*.

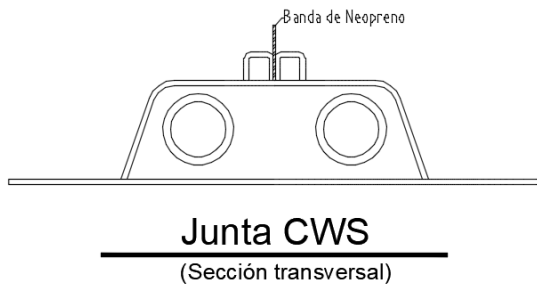


Ilustración 71 Junta CWS.



Ilustración 72 Junta CWS adherida al concreto.⁷

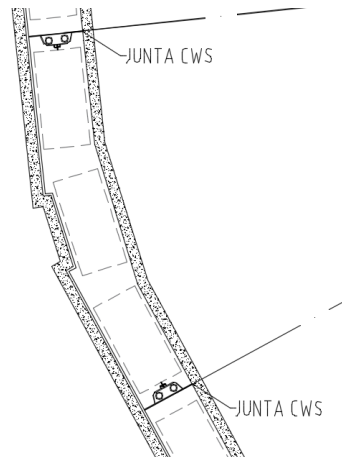


Ilustración 73 Distribución de juntas CWS en un panel primario.⁴⁷

Para sintetizar este procedimiento se muestran los siguientes esquemas, en donde se muestran tres segmentos de paneles:

- En la *ilustración 74*. Se tiene un panel excavado entre dos que no lo están y posteriormente se colocan juntas CWS en los extremos, este volumen será llenado con concreto fresco, cubriendo una cara de la junta.
- En la *Ilustración 75*, muestra otro posible caso cuando se excava un panel y en los adyacentes ya se coló previamente y por lo tanto ya cuentan con juntas, después en la *ilustración 76* se remueven esas juntas dejando los paneles adyacentes con la forma de la hembra y un segmento de la banda Water stop. Finalmente se realiza el

vaciado del concreto fresco en este volumen restante completando la secuencia y formando el machimbrado (*Ilustración 77*).

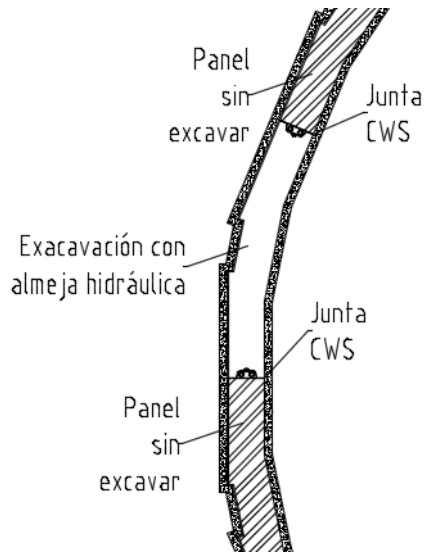


Ilustración 74 Primario: Colocación de Juntas CWS, posterior a la excavación.⁴⁷

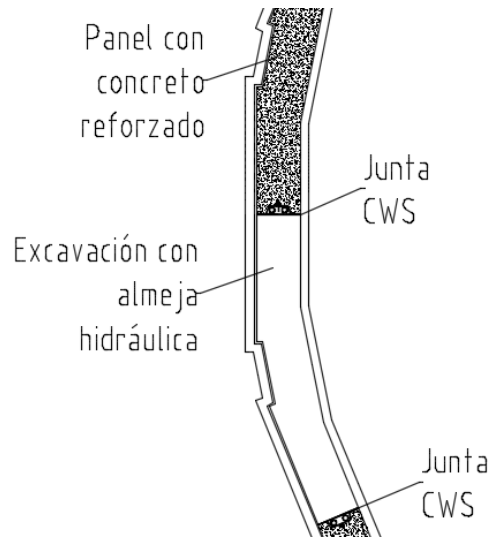


Ilustración 75 Secundario: Excavación de la zanja. Paneles adyacentes ya fueron colados.⁴⁷

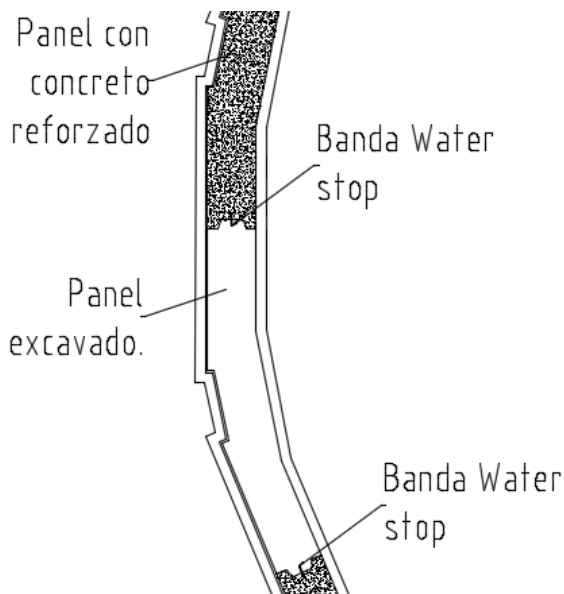


Ilustración 76 Secundaria Extracción de juntas. Panel adyacente con forma de la hembra.⁴⁷

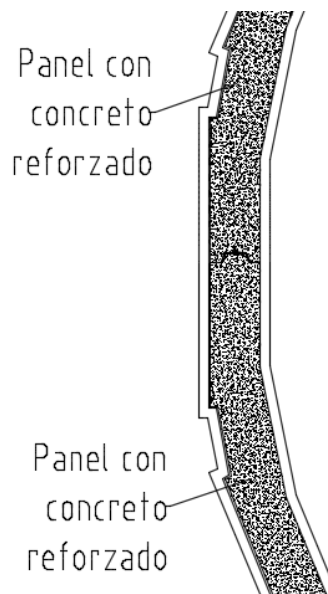


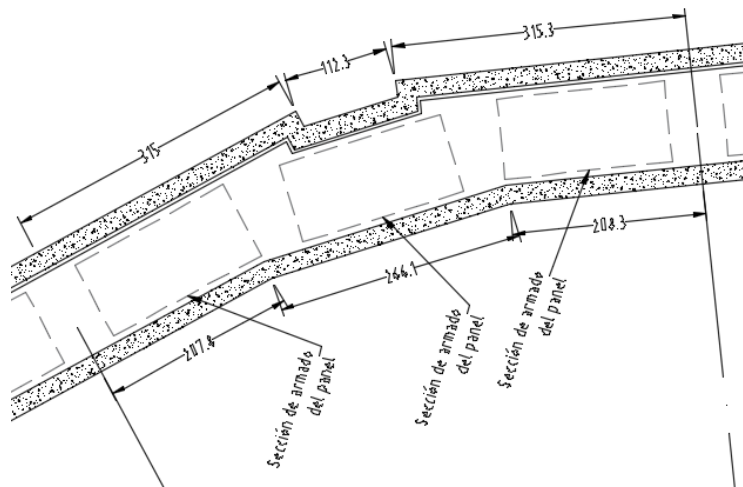
Ilustración 77 Colado del panel intermedio.⁴⁷

3.3.5 Colocación de acero de refuerzo

Es importante mantener un espacio predeterminado para colocar las jaulas correspondientes a los paneles. Fue necesario dejar un área para el habilitado y realizar maniobras de izado.

Habilitado

Serán 3 jaulas de acero reforzado (*Ilustración 78*), las que integren los paneles del muro Milán y estarán constituidas por varillas #8 y del #10.



*Ilustración 78 Distribución de armado que se coloca en un panel.*⁴⁷

Como se mencionó anteriormente, existe una sección en el predio de la construcción de la obra, que se utilizó específicamente para habilitar los elementos de las jaulas, las cuales se pueden apreciar en la *Ilustración 79*, ahí se producen estribos para las jaulas de acero reforzado.



Ilustración 79 Habilitado de acero.⁷



Ilustración 80 Producción de jaulas.⁷

Se habilitan en este sitio asas, las cuales permiten izar el elemento en la etapa del izaje. Posteriormente se proporcionaban estas piezas a una sección adyacente a esta para constituir las jaulas (*Ilustración 80, 81 y 82*). Se colocaron uniones entre varillas del #8 y #10 para darles una continuidad, evitando traslapes. (*Ilustración 83 y 84*)



Ilustración 81 Desarrollo de trabajos de soldadura en jaulas de acero reforzado.⁷



Ilustración 82 Colocación de estribos en jaulas de acero reforzado.⁷



Ilustración 83 Almacén de jaulas de acero reforzado.⁷



Ilustración 84 Conectores de aluminio.⁷

También en la *Ilustración 85* se puede ver la instalación de asas para su posterior manipulación.

A cada una de las jaulas producidas se le deben colocar encima puntales de madera que impidan el atrancamiento de otra jaula, para que de esta forma

sea más fácil almacenarlas y manipularlas en el momento del izaje. (Ilustración 86).



Ilustración 85 Colocación de asas para izaje.⁷

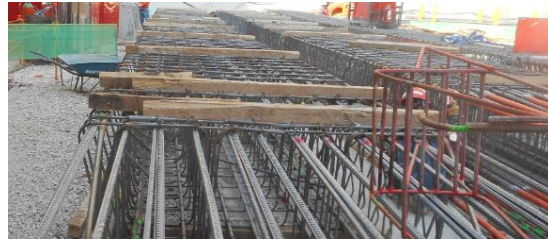


Ilustración 86 Colocación de polines de madera para evitar atrancamiento entre elementos.,⁷

Izado de armaduras.

Para desplazar la jaula de acero de refuerzo del área de habilitado al panel donde descenderá y se instalará, se usará una grúa móvil con pluma fija como medio mecánico, a la cuales están sujetas poleas y un balancín de carga. Esta herramienta cumple la función de sujetar las armaduras y hacer que bajen lo más vertical posible. Es posible apreciar esta herramienta en la *Ilustración 87*.



Ilustración 87 Izado. Uso del balancín.⁷

Como lo mencioné antes se le debe añadir a cada armadura un elemento para que la grúa las pueda desplazar, a este se le conoce como “asas para izado” y para la suspensión de la armadura cuando este se une a la armadura previamente instalada y mantenerlas en una posición vertical como se muestra en la *Ilustración 88*.



Ilustración 88 Izaje de la jaula sobre la zanja.⁷

En el caso particular del proyecto University Tower, se debe tener especial cuidado al realizar este procedimiento, debido a las limitadas dimensiones del predio ya que puede ocasionar un accidente.

Unión de armaduras

El armado de un panel se forma en 3 secciones colocadas de forma aislada en cada segmento del panel. Cada sección está dividida en 2 segmentos de jaulas de acero, ambas conforman la profundidad de la zanja.

La secuencia constructiva para llevar a cabo el armado del panel consiste en izar, desplazar y descender en la zanja la primera jaula de acero hasta que su borde superior este al nivel de la esquina superior del brocal. Se mantiene fija gracias a las asas de suspensión colocadas en un principio, en las cuales se introducen varillas que sostienen la estructura (Ilustración 89). La primera jaula se mantiene suspendida en la zanja atravesándole varillas que funcionan como soporte, estas se apoyan en el brocal.

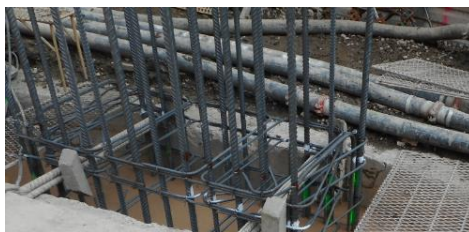


Ilustración 89 Colocación de jaulas de concreto en la zanja.⁷

Posteriormente se une la siguiente jaula izándola sobre la zanja y soldándola para mantenerlas monolíticas. A esta unión se le añaden estribos fijándola a la jaula (Ilustración 90)



Ilustración 90 Unión de dos jaulas.⁷

Después se retiran estas varillas que sostienen la jaula (*Ilustración 85*) y se hace descender ambas hasta que la parte superior llegue nuevamente al nivel superior del brocal.

Finalmente se hace lo mismo con la última jaula, completando con esta sección la longitud total para que el conjunto de jaulas llegue al fondo de la excavación.

El procedimiento descrito anteriormente se describe de forma resumida en la *ilustración 91*.

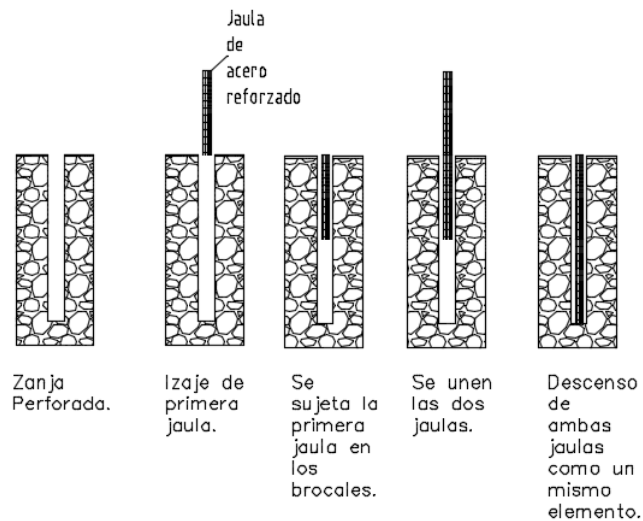


Ilustración 91 Procedimiento para instalar jaulas de acero de refuerzo.⁷

3.3.6 Vaciado del concreto fresco.

El procedimiento adoptado por todos los constructores de muros Milán para la puesta en obra del concreto es el del Tubo Tremie. El concreto utilizado es especial para la empresa (Tipo CIMESA) con agregados de $\frac{3}{4}$ y con un revenimiento de 18.

Sistema Tremie

El sistema, está conformado por un tubo Tremie y una tolva que se coloca en la parte superior. En este último elemento se vierte el concreto fresco.

Para facilitar el proceso se tiene una caja de depósitos de segmentos de tubo (*Ilustración 92*) para poder utilizarlos cuando sea requerido.



Ilustración 92 Depósitos de segmentos del Sistema Tremie.⁷

La columna de tubos Tremie se compone de segmentos de diámetro variable entre 150 y 120 mm (*Ilustración 93*) y de una longitud de 1 a 4 m, con un espesor de 8 mm. Estos segmentos se atornillan para alcanzar la profundidad requerida en el proyecto. Este tubo debe resistir la presión que ejerce el concreto por las paredes, es por eso que se coloca una junta entre cada segmento de tubo (*Ilustración 94*).

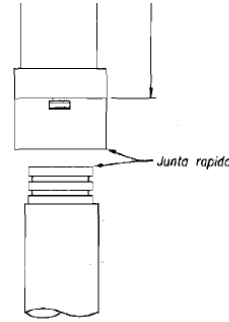


Ilustración 93 Segmentos del sistema Tremie.⁷ Ilustración 94 Juntas en los tubos Tremie.⁷

Al colocar el sistema Tremie, se debe instalar un sujetador que permita mantener estable al conducto en la zanja hasta que termine el proceso de vaciado.

Colado

Antes de llevar a cabo este concepto es importante que el conducto esté limpio y libre de cualquier residuo de algún trabajo previo.

El procedimiento descrito en la *Ilustración 95* se desarrolla de la siguiente manera:

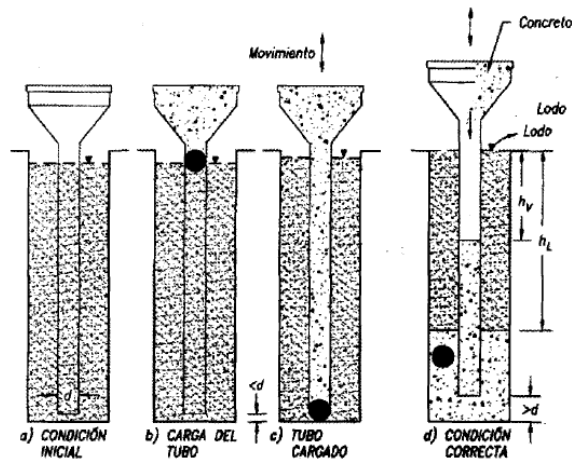


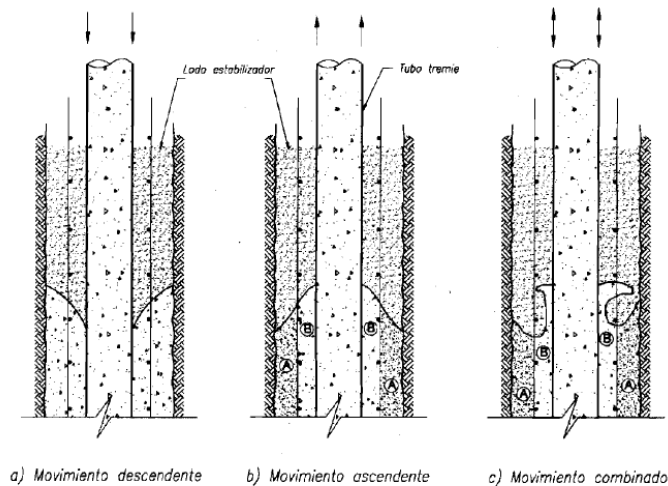
Ilustración 95 Etapas del Sistema Tremie.¹⁸

El vaciado del concreto se hace empezando desde el fondo de la excavación y ascender la punta de este conducto poco a poco. La punta no puede quedar sumergida más de 1.5 m. De esta manera se evita que una gran carga de presión ocasionada por el concreto fresco que yace sobre la punta. Debido a la diferencia de densidad entre el concreto y los lodos bentoníticos no se mezclan y a medida que el concreto fresco va ascendiendo por la zanja, comienza a desplazar al lodo de la zanja, haciendo un concreto de calidad.

Se le coloca un tapón deslizante desde el inicio del tubo Tremie, al cual se le conoce como “diablo”. Este elemento evita que el lodo bentonítico contamine al concreto. Por gravedad este va descendiendo empujando el tapón hasta llegar al fondo.

Al salir el flujo de concreto, debe tenerse cuidado de no erosionar el fondo de la excavación. Cuando la zanja cuenta con concreto fresco (*Ilustración 96*), aumenta la presión hidrostática en las paredes de la zanja, lo que puede causar deformaciones en el caso del proyecto University Tower, provocando que se vea reflejado en la forma final del muro. Dicha presión causada por el concreto fresco depende de:

- Altura de la columna
- Velocidad de colado
- Temperatura del concreto
- Movimiento del flujo.



- Ⓐ Concreto que ha alcanzado cierta rigidez
- Ⓑ Concreto más fluido

Ilustración 96 Etapas del vaciado del concreto.¹⁸

Finalmente, para concluir el colado del panel se suele extender el muro 1.5 m sobre lo predeterminado, debido a la posible contaminación del concreto con los lodos bentoníticos (Ilustración 97). Posteriormente para construir la trabe de coronamiento será necesario demoler esta sección. El material demolido debe dejar descubierto el acero de refuerzo para unir el muro con la trabe de coronamiento.

El rendimiento de vaciado de concreto por Tubo Tremie permite vaciar el concreto en un panel de 500 m³ en 8 hrs.

Errores más comunes en el sistema Tremie:

- Un problema común la obstrucción de agregados en el tubo Tremie, provocando que el concreto no pueda descender.
- Al no colocar la junta de cada tubo Tremie de forma correcta es posible que se contamine con el lodo bentonítico de la zanja.
- Suele haber lodo bentonítico atrapado en el concreto en la parte superior del muro por la arena que se sedimentó en el fondo de zanja, y no pudo salir, por tal razón debe sustituirse con concreto sano.
- Se debe evitar que el vaciado sea rápido para evitar caídos. Para calcular alguna anomalía en la cantidad de concreto fresco vertido, se

realiza una curva teórica. Si hubo un caído en las paredes de la excavación se va reflejar al requerir más material para rellenarse.



Ilustración 97 Contaminación de lodos de la parte superior del muro.⁷

3.4 Barrettes.

Este tipo de pilas, como ya se ha mencionado anteriormente son una innovación en las cimentaciones en la Ciudad de México. Se caracterizan por tener una sección transversal rectangular. Esta característica permite que tengan un momento de inercia mucho mayor, rigidizando el sistema.

Para construir barrettes se emplea el mismo procedimiento que se usó en los paneles de concreto de un Muro Milán. Se sigue la misma secuencia:

- Construcción de brocales.
- Excavación de zanja con almeja hidráulica a 75 m de profundidad.
- Colocación de juntas CWS.
- Colocación del armado
- Colado.

3.4.1 Excavación

Para la perforación de en el sitio donde se colarán los barrettes, se utilizará una almeja con un grosor de 1.2 m, que permita alcanzar los 75 m de profundidad. La ejecución de la construcción de los barrettes se puede apreciar en la *Ilustración 98 y 99*.



Ilustración 98 Excavación de barrettes radiales.⁷



Ilustración 99 Excavación de barrettes centrales.⁷

3.4.2 Juntas

Se colocaron juntas CWS al igual que en los paneles, solo que en este caso sin banda wáter stop en los barretes centrales del proyecto. A continuación, se pueden apreciar las características de dicha junta y su localización en las *Ilustraciones 100 y 101*. Este sistema solo se aplicó en los barretes centrales, donde son necesarios debido a su longitud, mientras que en los radiales no fueron necesarias.



Ilustración 100 Juntas CWS, sin banda de neopreno.⁷

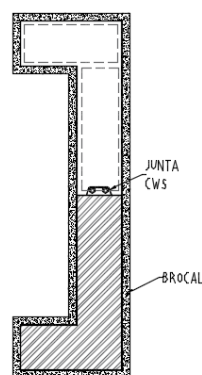


Ilustración 101 Localización de la junta en un barrette central.⁴⁷

3.4.3 Armado

Un barrette tendrá la longitud de 28.30 m. Debido a la gran profundidad a las que están desplantadas resulta imposible tener un control al maniobrar cada jaula, es por eso que para facilitar las maniobras de colocación a una profundidad de 46.5 m se añadirán extensiones (*Ilustración 102 y 103*) que permitan tener un mejor manejo de este elemento. Posteriormente a medida que se vaya excavando el núcleo será posible extraer dichas extensiones. En la siguiente imagen se pueden apreciar las extensiones, las cuales se unirán después a la jaula al descender en la zanja. Estaban constituidas por 8 varillas longitudinales del # 12.

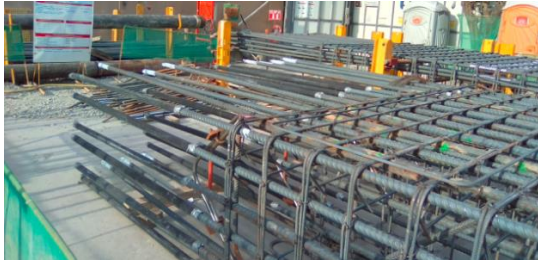


Ilustración 102 Acero de refuerzo de barretes centrales.⁷



Ilustración 103 Extensiones de acero de refuerzo del barrete.⁷

El arreglo del acero de refuerzo será como se aprecia en la *Ilustración 104*, constituyéndose por varillas del #12 con un f_y de 5600 kg/cm^2 .

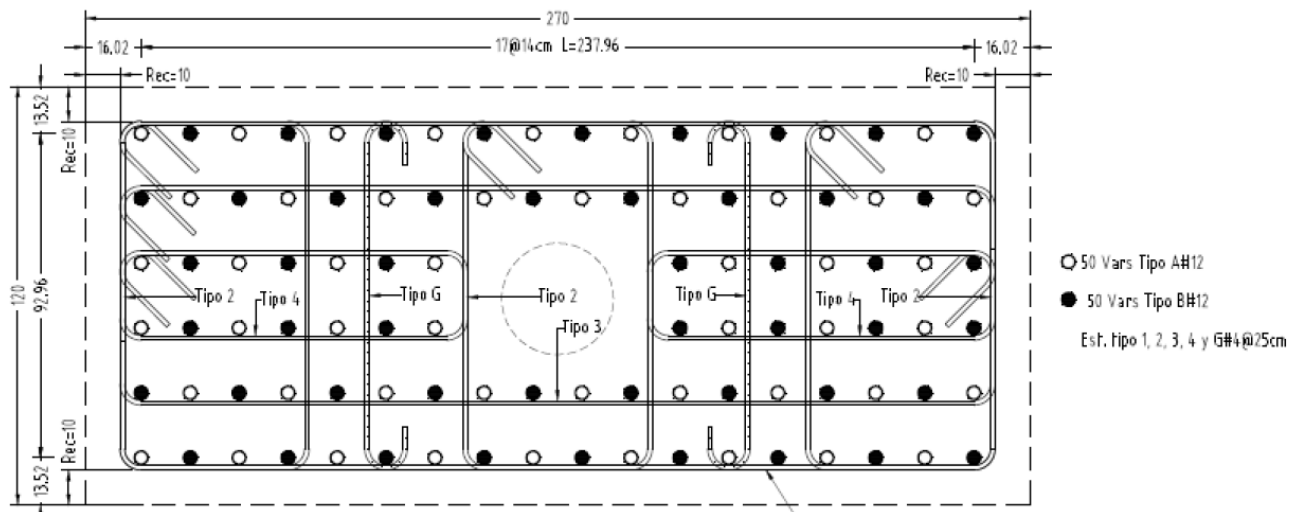


Ilustración 104 Arreglo de refuerzo de las var#12, $f_y=5600 \text{ kg/cm}^2$, Barretes.⁴⁸

3.4.4 Vaciado de concreto fresco

Al igual que en la construcción de paneles, se usó el sistema Tremie para el vaciado del concreto fresco, la cual se introdujo de la misma manera que en el caso de los paneles del muro Milán de la lumbrera.

A cada 4 m se debe colocar un sistema Tremie para garantizar el correcto vaciado del concreto y evitar que no se cubra todo el volumen del elemento. Por tal razón la configuración de sistema Tremie en los barretes se describen en la *Ilustración 105* y *106*.

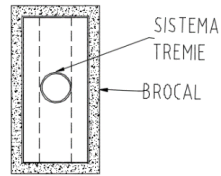
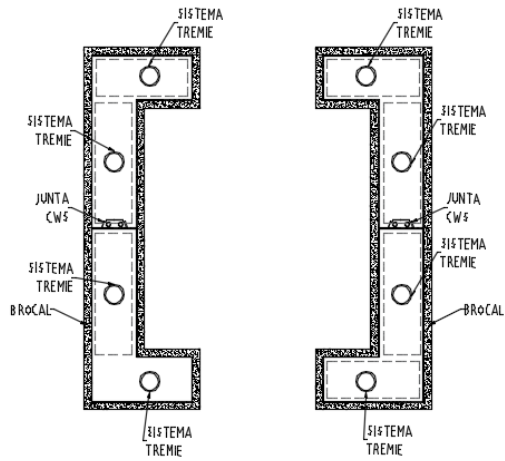


Ilustración 105 Ubicación de ~~de~~ en cada par Sistema Tremie en cada panel.

Barretes radiales. ⁴⁷

De esta manera el concreto era vaciado hasta los -48.10 m, sitio donde se construirá después la losa de fondo.

3.5 Trabe de coronamiento.

La trabe de coronamiento es un elemento de suma importancia, la cual tiene la función de conectar la estructura con la lumbrera y distribuir las cargas alrededor. Este elemento perimetral hace que todos los paneles a base de muros Milán trabajen en conjunto, dotando la estructura de rigidez en la parte superior de la subestructura.

3.5.1 Descabece de lumbrera

La construcción de este elemento comenzó al “descabezar” la lumbrera, lo cual consiste en demoler los 2 m superiores con el propósito de remover el concreto contaminado por el lodo bentonítico que no se pudo extraer durante el vaciado del concreto, ya que no reúne con los requisitos de control de calidad. Para realizar esta actividad se colocaron a las varillas longitudinales de las jaulas, tubos de PVC antes de vaciarse en concreto fresco, con el fin evitar que las varillas corrugadas tuvieran adherencia en el concreto y de esta manera fuera fácil removerlo. De no contar con dichas protecciones se puede correr el riesgo de dañar el acero de refuerzo y afectar su resistencia.

Para desarrollar esta actividad, se realizó una excavación de aproximadamente 1.5 m de espesor por 2.2 m de profundidad en el núcleo de la lumbrera para tener un más espacio para realizar maniobras con la maquinaria.

Al demoler, se usó un martillo hidráulico (*Ilustración 107*), el cual suele dejar un mal acabado por lo que es necesario que personal de la obra detalle con una pistola neumática dejando el área lo más liso posible (*Ilustración 108 e ilustración 109*).



Ilustración 107 Descabece de la lumbrera.⁷



Ilustración 108 Realización del acabado final.⁷



Ilustración 109 Acabado final de la lumbrera, después del descabezado.⁷

Un aspecto que se tiene que considerar, es mantener el material que se ocupa en un área estratégica para emplearse posteriormente, tal y como se ve el acero longitudinal en la *Ilustración 110*.

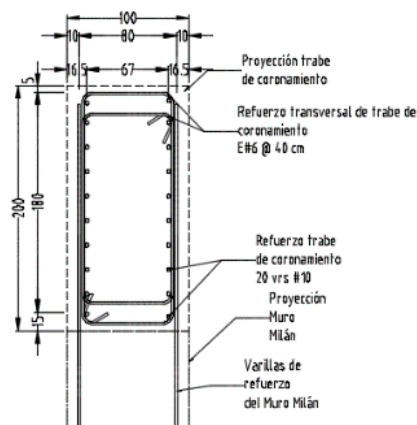
Al realizar esta excavación perimetral de la lumbrera, el firme de concreto de la superficie tendrá la función de una plataforma mientras se construye la trabe de coronamiento, permitiendo el tránsito de maquinaria.



Ilustración 110 Zona de habilitado en la plataforma.⁷

3.5.2 Acero de refuerzo

El arreglo de acero de refuerzo se puede ver en la *Ilustración 111*, la cual se compone de 20 varillas del #10 y estribos del #6 cada 40 cm.



*Ilustración 111 Arreglo de refuerzo en la Trabe de Coronamiento.*⁴⁸

Para constituir el acero de refuerzo de la trabe de coronamiento, se coloca el acero longitudinal del segmento, el cual tiene una longitud de 12 m. y puede unirse ya estando en su lugar con un extrusor. Dicha herramienta permite que toda la varilla trabaje conjuntamente como un elemento perimetral.

De acuerdo a las especificaciones de las normas que se muestran a continuación, mencionan los casos en los que es necesario el uso de estos conectores. El mínimo dimensión de varillas para que se puedan usar los extrusores son del #3 (*Ilustración 112 y 113*).

- ACI 318-77, inciso 12-15-3-4.
- ACI 349-76, inciso 7-5-5.
- ASME Sección III, División 2, Inciso CC-4333,2-3⁵¹

51 Mexpresa. Unión de Varillas por Conectores Extrusados. [citado 2019-04-15]. [En línea] Disponible en <https://www.mexpresa.com/>



Ilustración 112 Unión de varillas.⁷



Ilustración 113 Estribos antes de ser colocados.⁷

Para sellar correctamente la trabe de coronamiento con los paneles de la lumbrera, se usó una banda Hidroflex WaterStop (*Ilustración 114 y 115*). Se utiliza como sello hermético expansivo en juntas entre concreto curado y concreto fresco, evitando fugas y filtraciones en estructuras de concreto se le usarse en cisternas, plantas tratadoras, cimentaciones, albercas, cárcamos, túneles, plantas potabilizadoras, canales, etc. Entre sus ventajas se encuentran:

- Gran manejabilidad y moldeabilidad en obra, reduciendo altos costos de instalación
- Reduce significativamente el tiempo del sellado de la junta fría
- Excelente resistencia al envejecimiento, no se rigidiza ni se rompe
- Alta plasticidad permanente una vez encapsulado dentro de la junta
- Soporta altas presiones hidrostáticas
- Expande entre un 200% al 300% de acuerdo a la forma de la junta.⁵²



Ilustración 114 Colocación de juntas debajo del acero de refuerzo.⁷



Ilustración 115 Junta Hidroflex en el almacén.⁷

⁵²INSUL THERM. Impermeabilizantes [citado 2019-04-15]. [En línea] Disponible en: <https://insul-therm.mx/>

3.5.3 Construcción de ménsulas

Para rigidizar cada ménsula, se construirá una trabe secante en la lumbrera, la cual estará empotrada al armado de la trabe de coronamiento.

Estos elementos serán “ménsulas” y tendrán como principal objetivo, soportar directamente la estructura y transmitir esas cargas a la cimentación. Estarán apoyadas en la trabe de coronamiento de la lumbrera.

Para brindar una mejor idea de lo que se pretendió realizar se puede ver en la Ilustración 116, la cual muestra una vista en planta de la posición de una de las ménsulas soportando las que posteriormente serán las columnas de la estructura de la torre.

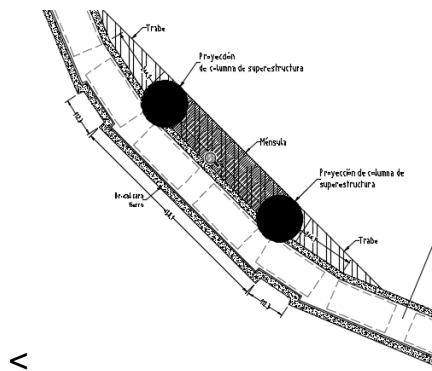


Ilustración 116 Vista en planta de la posición de las ménsulas y las trabes.⁴⁷

Antes de comenzar, se realiza una zanja perimetral en el área del núcleo de la lumbrera, a una profundidad igual a donde se desplantará la base de la ménsula, dicha excavación tendrá un espesor aproximado de 2 m. El peralte varía de acuerdo a las dimensiones de las ménsulas, la cuales se muestra en la Tabla 16. y a la Ilustración 117.

Ménsula	Peralte (m)
A	4
B	4
C	2
D	2.5

TABLA 21 Peralte de las ménsulas.

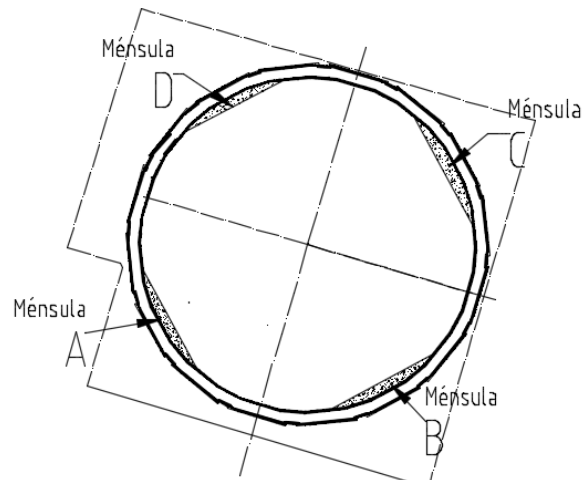


Ilustración 117 Ubicación de ménsulas.⁴⁷

A partir de ahí se tendrá una inclinación de 45°, de acuerdo a lo establecido en la NORMA Oficial Mexicana NOM-031-STPS-2011. Para realizar los trabajos correspondientes a la construcción de la ménsula, se coloca un firme de concreto en el fondo de la excavación por seguridad.⁴⁴

A nivel de calle, en la parte central del perímetro se mantendrá una sección del firme de concreto para maniobras de la maquinaria que se use para dichos trabajos, como camiones de volteo, retroexcavadoras, la grúa y para el camión mezclador de concreto

El empotramiento se desarrollará de la siguiente manera:

Como se muestra en la *Ilustración 118 y 119*, se removi6 el recubrimiento de la sección donde se encontrar6 el empotramiento de la ménsula en un segmento del muro excavado.



Ilustración 118 Preparación para empotramiento de ménsulas.⁷



Ilustración 119 Anclaje para ménsula.⁷

Posteriormente se instalará el anclaje necesario para poder transmitir las cargas de la estructura y se colocarán con Resina Epoxica HILTI de alto rendimiento, este material es especial para aplicarse con concreto. Se empleará un Taladro Hilti y un dispensador, de esta manera se constituye el armado del elemento y se coloca la cimbra.

Una vez colada la parte inferior de la ménsula, se realizará el armado correspondiente a la parte superior.

Con ayuda de extrusores que brindan a las varillas unirse evitando traslapes mediante un prensado en frío, con una supervisión simple y no se requiere ninguna preparación especial. En la *Ilustración 120*, se puede ver el uso de esta herramienta para unir varillas en la mitad de la trabe.



Ilustración 120 Colocación de acero longitudinal.⁷

En la Ilustración 121 se puede apreciar una configuración de varillas que permitirá unir la subestructura con estructura de la torre, estas secciones se empotrarán las columnas.



Ilustración 121 Conexión con la estructura de la torre.⁷

3.5.4 Vaciado de concreto de la ménsula

El vaciado del concreto se realizará en distintas etapas, la primera es aplicándolo en la parte inferior de la ménsula. La segunda se colará junto con una sección de la trabe de coronamiento.

Como se puede ver en la *Ilustración 122 y 123*. La cimbra de madera cubre el volumen de la parte inferior de la ménsula y lateralmente. Se apuntala apoyándose al talud de la excavación, el cual permite confinar el concreto. El vaciado de concreto se realizará como se mencionó anteriormente una bomba telescópica, que se introduce por la parte superior de la ménsula. Dicha actividad suele durar en promedio de 3 a 5 horas



*Ilustración 122 Colocación de cimbra.*⁷



*Ilustración 123 Apuntalamiento de la cimbra en la excavación.*⁷

Ya que se tiene constituida la parte inferior de la ménsula, se comienza con la colocación de acero de refuerzo en la parte superior o trabe secundaria.

Para realizar la actividad mencionada anteriormente es necesario reestablecer el nivel del fondo de la ménsula a uno que permita a los trabajadores colocar el acero de refuerzo y la cimbra, apuntalar y realizar el colado del elemento sin que presente riesgo alguno. Por lo que se colocará en este volumen residuos de la construcción y se le agregará “relleno fluido”, el cual es un material cementante de baja resistencia, y suele ser provisional. Al emplearse este material se puede tener un ahorro en el tiempo, del que se emplearía al compactarse un material de relleno, además no requiere compactación por capas. En la *Ilustración 124* se puede ver la renivelación a la base de la trabe de coronamiento. Antes de verter el relleno fluido se tapizó la pared de la ménsula con hule de color negro.

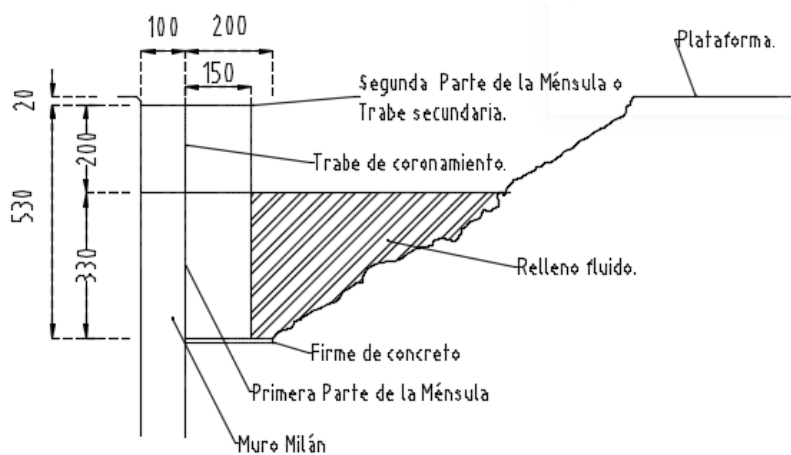


Ilustración 124 Renivelación para construir la ménsula superior.

Una vez conformado el armado de la parte superior de la *ménsula* (*Ilustración 125*), anclada a la Trabe de Coronamiento se realizará el colado tomando en cuenta una sección de la trabe de coronamiento con una ménsula. A cada extremo de la Trabe de Coronamiento que se colocará con la cimbra un tapón con Espuma de Polietireno (*Ilustración 126*), de la misma forma se les agrega diésel a las paredes de la cimbra como desmoldante.



Ilustración 125 Acero de refuerzo en la ménsula y en la trabe de coronamiento.⁷



Ilustración 126 Límites de la sección en donde se hará el vaciado del concreto.⁷

El vaciado del concreto fresco o colado se realizará en conjunto con una cuarta parte de la trabe de coronamiento, tal y como se observa en la *Ilustración 127*.



Ilustración 127 Olla de Concreto fresco.⁷

Como se muestra la *Ilustración 128*, cada segmento se colaba para que trabajara de forma monolítica.

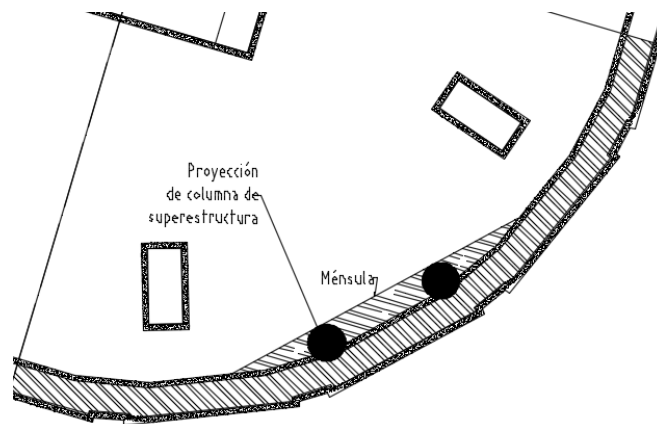


Ilustración 128 Sección en donde se vacía el concreto. Primer Tramo.⁴⁷

Al remover la cimbra, el aspecto de la trabe de coronamiento en conjunto con la ménsula se muestra en la *Ilustración 129*.



Ilustración 129 Aspecto de las preparaciones para las uniones con la estructura, después del colado.⁷

3.6 Excavación del núcleo.

Se entiende por núcleo a la parte del terreno confinada a un por el muro Milán, lo cual envuelve alrededor de 180 000 m².

3.6.1 Instalación de plataformas.

Para remover esta gran cantidad de material, se instalaron dos plataformas de acero sobre la lumbrera. Cada una de las plataformas de acero soportan 2 camiones de volteo Torton de 16 m³ y una draga de 90 ton (*Ilustración 130*). En el fondo de la excavación habrá dos excavadoras traspaleando para facilitar el acarreo de las dragas. Este elemento será provisional y serán removidas una vez que se concluya la excavación del núcleo. Fueron diseñadas en estos sitios por su cercanía a las salidas del perímetro de la obra, de esta manera se asegura el libre tránsito de los camiones de volteo cuando se extraiga material del núcleo.



Ilustración 130 Ubicación de plataformas.⁴⁷

La plataforma B será la primera en construirse, mientras se concluye con la construcción de las ménsulas en el área de la Plataforma A, esta ocasionará que se excaven zanjas perimetral más amplias para permitir el montaje de

la estructura a la profundidad correspondiente, dejando un área central cada vez más reducida. En esta sección se colocará una caseta donde se encontrará una grúa. Esta maquinaria permitirá realizar maniobras que es difícil hacerlas desde el perímetro de la lumbrera, como excavar ciertas zonas o levantar una caja metálica o canastilla, que puedan transportar trabajadores para que realicen maniobras de montaje como apretar tornillos estructurales en sitios inaccesibles.

La plataforma estará construida a base de losa acero de calibre 13 y un firme de concreto para el tránsito de maquinaria. Este material tiene ventajas al emplearse:

- Por su acanalado permite que este material se combine con facilidad al concreto y en realidad genera una losa con una mayor resistencia de carga y estructural.
- Fácil instalación.

La plataforma estará empotrada a la lumbrera, con lo cual al igual que en las ménsulas, se removerá el revestimiento en cada apoyo que se instale, para colocar una placa.

La estructura metálica de las plataformas como la que se muestra en la B, cercana a la Calle de Lucerna (*Ilustración 131*), será cubierta por losa acero y un firme de concreto.



*Ilustración 131 Composición de estructura de acero de la plataforma.*⁴⁷

Para la construcción de plataformas como se muestra en la *Ilustración 132* se realizaron las preparaciones para instalar las placas donde se soldaron los apoyos de la plataforma en la lumbrera. Posteriormente nuevamente se excavará a una profundidad aproximada del peralte de la ménsula, removiendo el relleno fluido colocado anteriormente. Dichas preparaciones se realizaron, removiendo el recubrimiento de la trabe de coronamiento.



Ilustración 132 Construcción de plataforma. Preparaciones en la lumbrera.⁷

Al igual que en los anclajes de las ménsulas (Ilustración 133) se barrenó insertando resina epóxica de alta resistencia. Al introducir la placa queda un espacio, el cual se rellena Grout, un mortero que soporta altas resistencias. Dicho material puede usarse de forma fluida y permitirá que la placa se adhiera a la lumbrera (ASTM C1107).



Ilustración 133 Colocación de placas en la trabe de coronamiento.⁷

En la *ilustración 134.*, en la plataforma A, se pueden apreciar las placas en los tres niveles donde se soldarán los perfiles tubulares. La excavación se hará en el sitio conforme avancen en la instalación de las plataformas.



Ilustración 134 Tres niveles de placas.⁷

En el fondo de la excavación se construyó un firme de concreto para mantener estables los andamios y el libre tránsito de los trabajadores que estén instalando la estructura de acero de la plataforma de acero, como se muestra en la *Ilustración 135*.



Ilustración 135 Firmes de concreto en el fondo.⁷

Se instaló la estructura de acero para la plataforma B (*Ilustración 136*) que consiste en 6 vigas IPR, ancladas cada una apoyada a su vez por 2 perfiles tubulares anclados en diagonal en la ménsula, lo cual va a sostener en conjunto la plataforma.



Ilustración 136 Montaje de estructura de la plataforma A y B.⁷

Los tornillos utilizados serán estructurales de A420 y A325, las tuercas serán de 2H, regidas por la normatividad AWS D1.1.

Posteriormente se colocará la losa de acero sobre la estructura metálica, para finalmente colocar el firme de concreto sobre la plataforma, como muestra en la *Ilustración 137*.



Ilustración 137 Colocación de losa acero.⁷

El aspecto en el que la plataforma se encontrará al finalizar su construcción es como se muestra a continuación en la *Ilustración 138*. Se puede apreciar que los perfiles verticales donde se amarraban cables para poder colocar los arneses ahora sirven como vallas de seguridad para las maniobras que se realizarán sobre la plataforma. El recubrimiento de concreto tiene un espesor de 20 cm.



Ilustración 138 Aspecto final de la plataforma.⁷

En la última etapa de la construcción de la plataforma se debe considerar empezar a constituir la pluma de grúa que sostendrá la draga. En la *Ilustración 139* se muestra el montaje.



Ilustración 139 Montaje de la pluma de la grúa.⁷

También es importante colocar un relleno (*Ilustración 140*) en sección donde del terreno donde está colocada la grúa central, la cual se encuentra todavía a nivel de calle. El propósito de este relleno es poder extraer al final la maquinaria que se encuentra en la parte central, recordemos que esta grúa

permitía cargar la canastilla que permitía realizar maniobras de habilitado en zonas inaccesibles. Este relleno une el segmento aun no excavado con la plataforma.



Ilustración 140 Aspecto final del relleno.⁷

La logística al excavar será abarcando turnos nocturnos para acelerar este concepto. En este horario podrán extraer material 7 camiones de volteo en una hora, existiendo afuera de 4 a 6 esperando ser usados.

Mientras se realiza la excavación mencionada anteriormente, se debe abatir el manto freático 1 m por debajo de la excavación para garantizar que se podrá trabajar en seco.

Es necesario remover el volumen del terreno del centro mantener la excavación del núcleo a una profundidad de 12 m aproximadamente mientras se terminan de construir las plataformas y se habilitan para ponerse en operación. De la Ilustración141 a la 144 se muestra la rampa de acceso para alcanzar los 12 m de profundidad.

<c



Ilustración 141 Rampa de acceso a la excavación del núcleo.⁷



Ilustración 142 Excavación del núcleo desde la superficie.⁷

|



Ilustración 143 Vista de plataforma.⁷



Ilustración 144 Aspecto general de la excavación.⁷

4. Medidas de seguridad durante la construcción de la obra.

En la sección 1.8 se analizaron de forma general las medidas de seguridad de la construcción de una obra de la norma NOM-031-STPS-2011, ahora se mencionarán las aplicaciones de esta norma particularmente en la construcción del proyecto University Tower.

Para el cumplimiento de esta norma una brigada se encargó a la supervisión del cumplimiento de las medidas de seguridad expuestas.

4.1 Señalización

Los señalamientos se colocaban en la obra en todas las zonas donde se podía generar o prevenir un accidente, como lo especifica en la norma, el color de los símbolos debe ser el mismo que el color contrastante. A continuación, se muestran algunos casos donde se emplearon dichos elementos.

- Es necesario con los señalamientos informar sobre el equipo de seguridad necesario o básica para cualquiera que ingrese a la obra (*Ilustración 145*), las rutas de evacuación, puntos de reunión, la velocidad máxima para un vehículo, entre otras precauciones que deben tomar los operadores de esta la maquinaria, como por ejemplo colocar una lona sobre los camiones de volteo que ingresan.



Ilustración 145 Señalamientos básicos.⁷

También se instalaron barras separadoras (*Ilustración 146*) alrededor del predio, como se mencionó antes, el perímetro de la construcción invade la banqueta, es por eso que se colocaron para garantizar el tránsito de los transeúntes.



Ilustración 146 Protección a transeúntes.⁷

- Se colocaron señalamientos alrededor de la zanja (Ilustración 147) del panel que se estaba perforando en ese momento para prevenir caídas.



Ilustración 147 Señalamientos en excavaciones.⁷

- Se colocaron en la maquinaria en un lugar visible (Ilustración 148), para prevenir accidentes cuando la maquinaria estaba realizando maniobras, como por ejemplo durante la operación de la almeja hidráulica en la perforación de la zanja o con la grúa durante el izaje.



Ilustración 148 Señalamientos en maquinaria.⁷

4.2 Seguridad en excavaciones.

De acuerdo a la Sección 11: Trabajos en Excavaciones de la NOM-031-STPS-2011, para prevenir accidentes se cubrieron con rejillas en zanjas y se colocaron barras separadoras (*Ilustración 149*) para impedir paso mientras no se estén haciendo trabajos en esta zona.



Ilustración 149 Rejillas para cubrir una zanja.⁷

En la excavación realizada durante la construcción de las ménsulas, aproximadamente de 5 metros de profundidad, como se mencionó anteriormente se dejó un talud de 45 ° de inclinación, colocando una malla geotextil (*Ilustración 150*) sobre el talud para prevenir derrumbes dándole cierta estabilidad.



Ilustración 150 Malla geotextil.⁷

4.3 Necesidad de limitar áreas.

De acuerdo a la Sección 12: Trabajos Confinados, por seguridad de los trabajadores que laboran en cada área dentro del perímetro de la obra es necesario que existan límites visibles, como por ejemplo en las actividades de habilitado del acero o del desarenador (*Ilustración 151*).



*Ilustración 151 Límites en áreas de trabajo.*⁷

Una obligación del patrón en cuestión a seguridad, es garantizar la salud de los trabajadores. Por tal razón se tienen protocolos en caso de un accidente y se cuenta con un botiquín médico y de una camilla (*Ilustración 152*).



*Ilustración 152 Botiquín de primeros auxilios y camilla.*⁷

4.4 Mantenimiento a maquinaria.

De acuerdo a la Sección 17 de la NOM-031-STPS-2011, cada determinado tiempo, se debe hacer un mantenimiento técnico para contrarrestar el desgaste y de esta manera evitar un accidente, como es el caso de la grúa (Ilustración 153).



Ilustración 153 Mantenimiento a la grúa.⁷

Se colocaron rejillas en los accesos de la obra (*Ilustración 154*), para limpiar las llantas de la maquinaria, con el propósito de no contaminar con materiales de la excavación las vialidades, haciéndolas resbalosas. De esta manera se evitan accidentes en el exterior.



Ilustración 154 Rejillas en los accesos.⁷

4.5 Equipo de seguridad

De acuerdo a la Sección 10: Selección del equipo de protección personal básico y específico de la NOM-031-STPS-2011 es muy importante que cada trabajador porte equipo de protección que afirme su seguridad en todo momento, dependiendo del trabajo que vayan a realizar, un ejemplo es el equipo que portaban los soldadores de arco eléctrico durante la instalación de la estructura de acero de la plataforma (*Ilustración 155*), en donde usaban arneses que les permitían desplazarse de un perfil a otro.



*Ilustración 155 Importancia de arneses.*⁷

5. Control de calidad en la obra.

En la sección 1.9 se detalló el control de calidad en diversos materiales como los lodos bentoníticos, concreto y acero. Ahora en esta sección se analizará de forma particular los procedimientos llevados a cabo en la construcción de obra University Tower.

Para asegurar el control de calidad tanto en materiales como en procesos constructivos llevados a cabo en la obra, existe una brigada dedicada a supervisar en todo momento que se cumplan de acuerdo a los reglamentos.

5.1 Pruebas de lodos Bentoníticos.

Como bien se mencionaba en el Capítulo 3, la calidad en los lodos bentoníticos fue algo fundamental en el control de calidad del proyecto, por lo que era necesario hacerles pruebas ´por turno y de esta manera garantizar resultados satisfactorios. A continuación, se muestran los resultados de las pruebas en reuso.

5.1.1 Prueba de viscosidad.

La viscosidad como ya se ha mencionado está relacionada con la resistencia del lodo y la tixotropía que se ejerce en las paredes.

Los resultados de la prueba fueron:

$$\textit{Tiempo de vaciado del embudo} = 47 \textit{ s}$$

$$30 \textit{ s} < 47 \textit{ s} < 60 \textit{ s} \therefore \textit{ Es aceptable en muro Milán y barrettes.}$$

Este lodo ya fue utilizado anteriormente, por lo que es normal que tenga esta viscosidad. Se puede ver el procedimiento en las *Ilustraciones 147 a 149*.



Ilustración 156
Vertido del lodo en el embudo Marsh.⁷



Ilustración 157
Obstrucción de orificio.⁷



Ilustración 158
Registro del tiempo en el que se vacía.⁷

5.1.2 Prueba de masa volumétrica.

La densidad permite una óptima velocidad de penetración al contrarrestar la presión del terreno, sin provocar pérdidas de circulación.

En la prueba se obtuvo el siguiente resultado:

$$\text{Densidad} = 1.16 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

$1.16 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} < 1.25 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \therefore$ es aceptable en un muro Milán, en barretes no aplica.

El procedimiento de dicha prueba se puede describir en las *Ilustraciones 15 y 160*.



Ilustración 159 Aplicación de lodo bentonítico en recipiente calibrado.⁷



Ilustración 160 Balanza de Baloid.⁷

5.1.3 Prueba de contenido de arena.

El contenido de arena en los lodos bentoníticos, afectan a la resistencia del cake, facilitando su agrietamiento, por tal razón se deben extraer al ser utilizadas.

Los resultados de la prueba fueron:

*Cantidad de arena en la muestra = 10 %
Contenido alto de arena, no aplica en reuso.*

El proceso que se siguió en esta prueba se muestra en las *Ilustraciones 161 a 163.*



*Ilustración 161
Vaciado del lodo
en el
eleutiometro.⁷*



*Ilustración 162
Filtración de lodos
bentoníticos⁷*



*Ilustración 163
Eleutiometro con
arena.⁷*

5.1.4 Prueba de espesor de película impermeable y filtración.

Esta película impermeable o también conocida como “cake”, se puede apreciar en las paredes de la zanja y tiene como propósito desarrollar y aplicar la presión del fluido estabilizador a las paredes de la excavación.

Los resultados que se obtuvieron en esta prueba fueron:

*Filtración = 28 ml
28 ml < 50 ml ∴ Es aceptable en muros Milán y barrettes.*

Se puede apreciar el cake sobre el papel filtro:
Los resultados establecen que mide:

$$\text{Espesor del cake} = 4 \text{ mm}$$

$4 \text{ mm} < 6 \text{ mm} \therefore$ Es aceptable para muro Milán y barrettes .

El procedimiento para la realización de esta prueba se puede describir en de la *Ilustración 164 a la 169*.



Ilustración 164
Vertido del lodo bentonítico.⁷



Ilustración 165
Reposo de la muestra.⁷



Ilustración 166
Colocación de carbono.⁷



Ilustración 167
Papel filtro en la prensa.⁷



Ilustración 168
Papel filtro con el cake.⁷

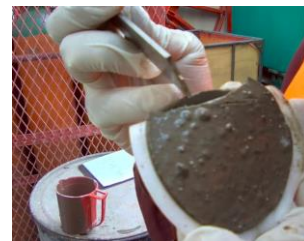


Ilustración 169
Medición del espesor del "cake".⁷

5.1.5 PH

Con el PH, se puede asegurar que no haya contaminantes en la mezcla. De acuerdo a la prueba que se realizó en obra el resultado fue:

$$PH = 10$$
$$7.5 < 10 < 12$$

Es aceptable para muro Milán y barrettes.

El papel utilizado para dicha prueba se puede ver en la *Ilustración 170*.



Ilustración 170 Papel Tornasol.⁷

5.2 Pruebas del concreto.

El concreto fue uno de los materiales más empleados durante la construcción de la subestructura por lo que se realizaron todas las pruebas mencionadas en el tema 3.2. En obra solamente se realizó la Prueba de revenimiento para medir la trabajabilidad y se elaboraron cilindros de concreto los cuales fueron llevados a un laboratorio (*Ilustración 171*). Estas pruebas deben realizarse cada vez que sea necesario realizar un colado y llegué una olla de concreto premezclado.



Ilustración 171 Elaboración de cilindros de concreto.⁷

Un aspecto muy importante en la construcción del muro Milán, es comprender la irregularidad de las paredes de la zanja previo al colado, por tal razón es común visualizar imperfecciones en el acabado final del muro Milán (*Ilustración 172*). Por tal razón es necesario inspeccionarlo a medida que se vaya excavando, para dejar el mejor acabado posible.



Ilustración 172 Imperfecciones en el muro Milán.⁷

5.3 Pruebas en el acero.

Se debe hacer una inspección del acero, en el caso de las varillas que integraban los barretes, el muro Milán y la trabe de coronamiento fueron sometidas a pruebas en laboratorios externos. Las varillas deben ser sometidas a la Prueba de Doblez y Tensión, las cuales son pruebas destructivas de acuerdo a la norma NMX-B-456-CANACERO-2013.

En el caso de la soldadura en los perfiles se busca que no tengan fisuras interas que puedan ocasionar fallas o no se alcance la resistencia esperada. Por lo que se realizan pruebas para asegurar su eficiencia como por ejemplo la Prueba de Ultrasonido (soldadura de botón) y la Prueba de Líquidos Penetrantes (soldadura de filete). También se deben hacer diversas inspecciones en la soldadura y en los tornillos estructurales (*Ilustraciones 173*). Dichas consideraciones se mencionan en el AWS D1.1.



Ilustración 173 Unión de perfiles de acero.⁷

6. Conclusión.

De un proyecto de estas magnitudes por sus novedosos procedimientos y su innovadora propuesta se pueden aprender diversos aspectos, no solo en construcción sino en el diseño estructural y en el análisis geotécnico de la subestructura.

De acuerdo al tipo de suelo que se encuentra en la zona, es necesario buscar diversas alternativas de construcción de cimentaciones que puedan contrarrestar los hundimientos típicos por el alto contenido de arcilla en distintos estratos del terreno y mantener la estabilidad en el terreno. Se tiene el caso de la Torre Latinoamericana donde se desplantaron pilotes en la Capa dura del terreno a 33 m de profundidad. En cambio, en la reciente Torre Reforma en Paseo de la Reforma, se construyeron 9 sótanos para compensar el peso de la estructura sin complementar con pilas o pilotes en la base.

Para estabilizar la excavación es importante diseñar un adecuado sistema de control del manto freático para evitar inundaciones o fallas de fondo. En el caso del proyecto University Tower se resolvió adecuadamente instalando 4 pozos dentro del núcleo de la lumbrera que estuvieran abatiendo el manto freático hasta llegar a la base de la excavación. La misma lumbrera trabaja como barrera, hasta el nivel donde se desplanta dicha estructura en los acuíferos de los depósitos profundos de arenas. Dicho acuífero es confinado y es el que más afecta a la base de la excavación, ya que puede haber riesgo de ocasionar una falla de fondo. Sin embargo, es necesario retirar el agua en los estratos arcillosos para disminuir la presión de poro.

Como lo mencioné en los primeros capítulos de la tesis, University Tower es el primer proyecto en el país que emplea una lumbrera en la subestructura construida a base de muros Milán, reconociéndose esta construcción por su innovación. De esta manera se comprendió que, al llevar a cabo una construcción, existen diversos procedimientos propuestos que se pueden aplicar y dependen de las condiciones como las mismas características del proyecto arquitectónico, la experiencia, el tipo de suelo y la disponibilidad de recursos de la construcción que tenga la empresa que va a desarrollar el proyecto. Un ejemplo para ilustrar este concepto son las

alternativas que existían al elegir la forma del cajón de cimentación o el procedimiento para estabilizar la excavación. En esta etapa se descartó por ejemplo el uso de anclajes, el troquelamiento y además se definió la forma de la estructura.

Logística en la construcción de la obra

Uno de los principales aspectos que se tienen que cubrir, es haber una planeación adecuada que permita tener la logística para poder organizar la obra. En cada etapa debe haber el debido orden, por ejemplo, ubicando el material que se va a ocupar en el espacio donde se facilite tomarlos para su colocación, como en el caso de las jaulas del acero reforzado en los paneles del muro Milán o de los barrettes, la ubicación de la maquinaria en un lugar estratégico que minimice los tiempos de ejecución de un determinado concepto y también la trayectoria que deben de seguir los camiones de volteo que ingresan en el predio de la obra.

Control de calidad

En el caso de la verticalidad de la excavación de cada panel del muro Milán, de acuerdo a la memoria de cálculo debe ser de máximo 0.4 %, este aspecto es muy estricto comparándolo con diversas normas. Se debe a que solo permitiendo esta verticalidad se puede alcanzar la mínima resistencia necesaria en la lumbrera. De acuerdo a la norma NF EN 1538 Muro Diafragma esta debe ser de 1%, mientras que en las Normas Técnicas Complementarias para construcción y Diseño de Cimentaciones debe ser de 3% para excavaciones desplantadas a más de 30 m

Otra parte fundamental en la construcción de muros Milán y barrettes poner especial atención en el control de calidad de los materiales, en especial de los lodos bentoníticos. Son los que van a definir el aspecto y resistencia del muro, por ejemplo, si se excede la cantidad de arena permitida es posible que se mezcle con el concreto impidiendo que sea sano y alcance la resistencia propuesta en el diseño, o si no tiene la viscosidad óptima la arena puede que no pueda ser separada adecuadamente en el vaciado del concreto fresco.

En el caso del concreto fresco, el revenimiento debe ser el correcto, de otro modo puede que queden vacíos en el muro o en los barretes o si el agregado no es especificado puede que obstaculice el vaciado del concreto dentro del acero de refuerzo o al descender el tubo Tremie.

Seguridad

En todo tipo de obras se debe tomar como un asunto prioritario la seguridad de los trabajadores, ya que diario están expuestos a grandes riesgos y es necesario tener un protocolo de seguridad para prevenir, en caso de haber accidentes.

Obras temporales

Las obras temporales cumplen un papel primordial en el desarrollo del proyecto es necesario tomarlas en cuenta para el presupuesto final del proyecto como por ejemplo las plataformas se empotran sobre la lumbrera para excavar el núcleo.