



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**



FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES DE INGENIERÍA

CAMPO DE CONOCIMIENTO: INGENIERÍA CIVIL

PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO DE UNA LUMBRERA POR
MURO MILÁN

T E S I N A

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

ESPECIALISTA EN CONSTRUCCIÓN

PRESENTA:

ING. JOSÉ EMMANUEL GRANADOS TOVAR

DIRECTOR DE TESINA: M.I.D.E. JOSÉ ANSELMO PÉREZ REYES

CIUDAD DE MÉXICO

MAYO 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Contenido

1. Introducción.....	6
1.1. Objetivo.....	6
1.2. Antecedentes.....	6
1.3. Gerencia de Obra.....	8
1.3.1. Organigrama.....	8
1.3.2. Programa de obra.....	8
1.3.3. Análisis de riesgo.....	9
1.3.3.1. Mecanismos para resolución de controversias.....	11
2. Caracterización del terreno.....	12
2.1.1. Suelo blando.....	12
2.1.2. Suelo firme.....	12
2.1.3. Roca.....	13
2.2. Construcción de lumbreras en suelos blandos.....	14
2.2.1. Lumbrera flotada.....	15
2.2.2. Anillos prefabricados o Método Convencional.....	17
2.2.3. Muro Milán.....	18
3. Bases de Diseño.....	21
3.1. Generalidades.....	21
3.2. Uso y ubicación.....	22
3.3. Descripción geométrica.....	23
3.4. Consideraciones del diseño.....	23
3.4.1. Consideraciones de normas y referencias aplicables.....	23
3.4.2. Consideraciones geológicas.....	24
3.4.3. Modelo geotécnico.....	24
3.5. Diseño geotécnico.....	26
3.5.1. Estabilidad de zanja para Muro Milán.....	26
3.5.2. Empujes horizontales.....	27
3.5.3. Tipos de fallas.....	29
3.5.4. Análisis de estabilidad.....	34
3.6. Diseño estructural de Muro Milán.....	37

3.6.1. Generalidades	37
3.6.2. Brocales.....	41
4. Procedimiento constructivo.....	44
4.1. Plataforma de trabajo	44
4.2. Brocales.....	44
4.2.1. Excavación para la construcción de brocales.....	44
4.2.2. Construcción del brocal temporal.....	45
4.3. Tableros de muro Milán.....	45
4.3.1. Excavación de tableros de muro Milán.....	45
4.3.2. Sustitución de suelos por lodo bentonítico.	46
4.3.3. Introducción de juntas planas.....	48
4.3.4. Armado de muro Milán.....	49
4.3.5. Aspectos a considerar en el izado del armado	52
4.3.6. Colado de muro Milán	53
4.3.7. Desmante de juntas planas.....	56
4.4. Mejoramiento del terreno (Jet Grouting)	56
4.5. Excavación del núcleo de la Lumbrera.....	58
4.5.1. Excavación de núcleo en suelos duros.....	59
4.6. Anillo de rigidez.....	60
4.7. Losa de fondo.....	60
5. Conclusiones	61
6. Propuesta	63
7. Anexos.....	65
8. Bibliografía	71

Tabla de figuras

FIGURA 1 ORGANIGRAMA TIPO	8
FIGURA 2 MECANISMO DE FALLA DE FONDO TERZAGHI-PRANDTL (TAMEZ, 2001)	30
FIGURA 3 MECANISMO DE FALLA POR SUBPRESIÓN	333
FIGURA 4 JUNTAS METÁLICA MACHIHEMBRADA DE MURO MILÁN (TAMEZ 2001)	487
FIGURA 5 CENTRADORES (SMIG 2002)	50
FIGURA 6 OREJAS DE FIJACIÓN DEL ACERO DE REFUERZO (SMIG 2002)	51
FIGURA 7 EMPLEO DE BALANCÍN (SMIG 2002)	52
FIGURA 8 TUBERÍA TREMIE (SMIG 2002 Y TAMEZ 2001)	54
FIGURA 9 SECUENCIA DE CONSTRUCCIÓN (TAMEZ 2001)	55

Resumen

En el presente documento se describe la secuencia constructiva general de una lumbrera basada en el método de Muro Milán, para lo cual se abordarán el análisis geotécnico y estructural de la misma con la intención de revisar su estabilidad durante y posterior a su construcción.

Se describe el procedimiento a seguir desde el trazo y nivelación, la preparación del terreno para el tránsito de la maquinaria que se utilizará, así como el procedimiento empleado para la excavación de la zanja que ocuparán los muros, la cual se estabilizará con lodo bentonítico, también es descrita la manera en la cual se debe de colocar el armado de los muros y los cuidados que se deben de tener durante el izaje; el colado se realizará mediante tubería tremie.

El procedimiento de la excavación de la lumbrera se dividirá en dos etapas, por la geología que presenta en este sitio, la cual está compuesta de suelos blando y suelos duros, en los primeros se ocupará una grúa con almeja loca y en los siguientes se bajará una excavadora CAT 330 o similar para continuar la excavación.

También se detalla el proceso constructivo de los otros elementos estructurales como la trabe de coronamiento, el anillo de rigidez y la losa de fondo.

El mejoramiento de suelo se realiza con la técnica de Jet Grouting la cual consiste en una barrenación para una posterior inyección de mortero mediante el mismo equipo de perforación, el mejoramiento se realizará en la entrada y salida del túnel.

Abstract

This document describes the general construction sequence of a shaft based on the slurry wall method, for which it addressed the geotechnical and structural analysis of the same with the intention of reviewing the suture during and after its construction.

It describes the procedure to follow from the stroke and leveling, the preparation of the ground for the transit of the machinery that is used, as well as the procedure used for the excavation of the trench that occupies the walls, which is stabilized with bentonite mud, It also describes the way in which the reinforcement of the walls must be placed and the care that must be taken during the movement; the strained by a tremie.

The excavation procedure of the port was divided into two stages, by the geology that presents in this site, which is composed of hard floors, floors and soils, in the first you can place a crane with local clam and in the following a CAT 330 or similar excavator will be lowered to continue the excavation.

The construction process of the other structural elements such as the crowning bead, the rigidity ring and the bottom slab are also detailed.

The improvement of the soil is made with the Jet Grouting technique which consists of a drilling for a subsequent injection of mortar by the same drilling equipment, the improvement was made at the entrance and exit of the tunnel.

1. INTRODUCCIÓN.

La lumbrera será un elemento de un sistema de drenaje, para el desalajo de agua residual a través de un túnel, el cual será construido a través de métodos mecanizados, la lumbrera estará emplazada en suelo blandos.

La estructura que se empleará en esta lumbrera será a base de muro Milán perimetral de concreto armado de 1.0 m de espesor en la totalidad de su longitud de 40 m. En el nivel -25.0 m de profundidad se construirá un anillo de rigidez de 1.0 m de peralte que ayudará a resistir los esfuerzos generados en el muro Milán cuando éste se rompa para el paso del túnel.

En la parte superior (nivel 0.00 m) se construirá una trabe de coronamiento que ligará estructuralmente los paneles de muro Milán. La excavación dentro del área confinada por el muro Milán será en frentes verticales cuya altura depende de los rendimientos de extracción del material.

1.1. Objetivo

El propósito de este documento es describir el procedimiento constructivo de una lumbrera emplazada en suelos blandos (arcillas), así como la revisión de las actividades relacionadas con su construcción y las posibles fallas que se desprenden de su análisis geotécnico y estructural durante y posterior a la construcción de la misma.

1.2. Antecedentes

Geotécnicos

De acuerdo con el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal y sus Normas Técnicas Complementarias par Diseño y Construcción de Cimentaciones (2004), el Distrito Federal puede dividirse desde el punto de vista geotécnico en tres zonas:

- a) Zona I.
- b) Zona II.
- c) Zona III.

Siendo la última zona llamada zona lacustre en la que se localizará la lumbrera. Esta zona es perteneciente al antiguo lago de Texcoco, donde el subsuelo está compuesto por estratos de arcilla blanda, de gran espesor, con alto contenido de agua, baja resistencia al corte y alta compresibilidad. Adicionalmente, se encuentran dos capas constituidas por arenas limosas permeables, la primera a 27 m de profundidad con un espesor aproximado de 2 m y la segunda, de mayor espesor, ubicada a más de 40 m de profundidad (Meza *et al.*, 2012).

Hidráulicos

De acuerdo con la Dirección General de Divulgación de la Ciencia, UNAM (2016), la cuenca de México esta escudada por la sierra de las cruces en el oeste y la sierra del Chichinautzin al sur, originalmente era una cuenca endorreica, es decir el agua que la ocupaba no contaba con salidas, posteriormente por distintos fenómenos geológicos el agua comenzó a filtrarse. En el siglo XV, en una parte central de la cuenca había topográficamente zonas como islas en donde se asentaba la población azteca. Además, debido al Albarradón de Nezahualcóyotl, quedó dividida en el Lago de México y el Lago de Xochimilco. Durante la Conquista se construyó el Albarradón de San Lázaro y esto formó un semicírculo que rodeaba la ciudad por el lado oriente. A principios del siglo XX se terminó de construir el gran canal de desagüe y en la década de 1960 inició la construcción del drenaje profundo para ir sacando las aguas negras de la Ciudad de México.

1.3. Gerencia de Obra

La gerencia de obra se puede describir como el proceso mediante el cual se diseña de principio a fin un proyecto, cuyo objetivo principal será que se realice y cumpla de manera eficiente el proyecto. Sin la gerencia de proyecto no se podría alcanzar los objetivos del proyecto.

Las funciones básicas de la gerencia de obra son: supervisión técnica, planeación, organización, dirección, control, administración financiera y manejo contractual.

1.3.1. Organigrama

Es una representación en forma gráfica que ofrece una jerarquización de los componentes de la empresa. La jerarquización se debe a que cada trabajo o función es diferente del responsable que lo realiza. El diagrama tipo para este tipo de obra es el siguiente:

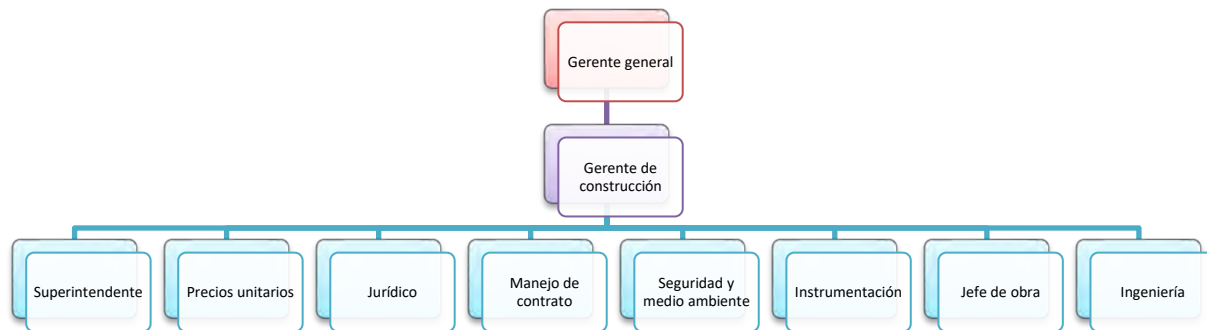


Figura 1 Organigrama tipo

1.3.2. Programa de obra

Es un instrumento que sirve como comunicación y control para cumplir el plazo otorgado de construcción. Este documento deberá de contener las actividades realizadas de tal manera que se puedan corroborar el cumplimiento de los procedimientos, también deberá contener los

rendimientos supuestos a fin de poder ratificar los tiempos del programa. Así mismo, contendrá las fechas importantes de entrega. Para el seguimiento y control se realizará un informe de avance.

Las herramientas que se pueden emplear para el control de este instrumento son los diagramas de Gantt los cuales son gráficos que ayudan a planear y programar tareas que constan de periodos determinados, es fácil visualizar la duración y fechas de las actividades, así como visualizar las actividades precedentes y posteriores.

1.3.3. Análisis de riesgo

El análisis de riesgo permite la identificación de los eventos que pueden impactar negativamente a un proyecto. Por lo tanto, es un método para resolver problemas y prevenirlos.

Los principales objetivos del análisis de riesgo son: determinar los riesgos en la ejecución de obras, determinar indicadores que afecten a la construcción de obra y determinar el riesgo de mayor importancia en la evaluación.

Según no es posible enumerar los riesgos, pero si es posible su tipificación en función de sus causas, como se describe a continuación (Lombardo A. & Pérez J.A., 2016):

- a) Riesgo asociado a la geología: su estudio debe considerar la caracterización geológica, geotécnica, geohidrológica y la integración de todo ello en el perfil más aproximado a la realidad; considera:
 - Investigaciones limitadas.
 - Validación inadecuada del modelo geológico e hidrológico durante la construcción.
 - Imprevisibilidad geológica.

b) Riesgo asociado al diseño: se refiere a la dificultad de adaptar el diseño previsto a las condiciones geomecánicas reales del sitio de excavación y a las propias condiciones contractuales. Esto se acentúa por una predicción inapropiada de las condiciones de excavación y de los escenarios de riesgo.

- Inexperiencia del diseñador.
- Establecimiento de soluciones de baja o difícil constructibilidad.
- Inadecuada definición de los rangos de operación de la máquina tuneladora.
- Falta de normatividad.

c) Riesgos asociados a la construcción: se debe considerar que este tipo de trabajos se ejecutan a lo largo de formaciones geológicas en el subsuelo y, por tanto, la afectación a su entorno y al propio proyecto irá en función de la heterogeneidad del terreno y de la cercanía a las estructuras preexistentes.

d) Riesgo financiero. Asociado al riesgo social y político y en donde el contratista debe trabajar de forma integrada con las autoridades para estudiar las implicaciones económicas y sociales, los impactos ambientales, etc., de la obra. Este tipo de riesgos considera, fundamentalmente:

- Suspensión de pagos.
- Seguros, licencias, patentes.
- Normas.
- Disponibilidad y disposición del sitio de construcción.
- Demora en las obras.
- Daños y perjuicios.
- Huelgas.

- Progresión de pagos según lo especificado.
- Compromisos de financiamiento.

1.3.3.1. Mecanismos para resolución de controversias

Asociado al análisis riesgos existen mecanismos de resolución de controversias que permiten una solución ágil y consensuada de eventos asociados a este tipo de proyectos para estos mecanismos existen varias herramientas como lo son el “Baseline report”.

El “Baseline report” tiene el propósito de reducir tiempo en las controversias que se presentan en la construcción del proyecto.

Cabe señalar que la información técnica preliminar de un proyecto y el impacto de ésta sobre su desarrollo se desenvuelve típicamente durante la fase de diseño, sin embargo, poco de ésta se documenta en el contrato lo cual no permite la designación clara de las responsabilidades para cada una de las partes. En dichas condiciones, el contratista no puede identificar las implicaciones técnicas del proyecto, por lo que puede incurrir en interpretaciones muy optimistas que, al no cumplirse, repercuten en reclamos hacia el contratante por circunstancias no previstas, por lo tanto, el “Baseline report” permite (Lombardo A. & Pérez J.A., 2016):

- Al contratista: sentar las bases de diseño para el correcto planteamiento del costo estimado de la construcción, incluyendo la previsión sobre posibles contingencias que determinen costos adicionales al proyecto.
- Al contratante: anticipar los riesgos asociados al proyecto y, sobre estos, administrar el contrato y evaluar el desempeño del contratista durante el desarrollo del proyecto.
- A todas las partes: Sentar las bases de diseño asociadas a la construcción subterránea, comprenderlas y definir claramente las restricciones asociadas a los procedimientos.

2. CARACTERIZACIÓN DEL TERRENO

La caracterización geotécnica del sitio tiene como principal objetivo asignar parámetros a los estratos que conforma el terreno donde se construirá alguna obra de infraestructura; con base a un programa de exploración del sitio de estudio con los que se determinarán espesores, condiciones de presión de agua, propiedades mecánicas de los suelos (resistencia, compresibilidad y permeabilidad) y propiedades índice; con el fin de realizar modelos geotécnicos del sitio, lo que permitirá facilitar el diseño geotécnico de la obra.

2.1.1. Suelo blando

Se les denomina suelo blando a aquellos cuyas características permiten grandes deformaciones al aplicarles una carga estática o dinámica y ofrecen poca resistencia al esfuerzo cortante. También se pueden caracterizar por tener altos contenidos de humedad como los que se encuentran en las arcillas de la Cuenca del Valle de México.

En la Cuenca del Valle de México la zona lacustre se integra por grandes depósitos de arcilla altamente compresibles y con altos contenidos de humedad, suelen estar separadas por lentes de arena de diferentes espesores los cuales suelen estar acompañados por diversos contenidos de limo o arcilla. Estos depósitos pueden tener espesores superiores a 50 m.

2.1.2. Suelo firme

Se les denomina suelo firme a aquellos cuyas características no permiten grandes deformaciones al aplicarles cargas estáticas o dinámicas, así también su consistencia es de firme a dura por lo cual tienen una alta resistencia al esfuerzo cortante.

2.1.3. Roca

La roca puede definirse como un agregado natural duro, cementado y compacto, de partículas minerales con fuertes uniones cohesivas permanentes. Esta puede ser de origen ígneo, sedimentario o metamórfico. La proporción de diferentes minerales en ella, estructura granular, textura y origen sirven para su clasificación geológica.

Se pueden clasificar las rocas por su origen:

Rocas ígneas, son aquellas que se forman a través del enfriamiento del magma; estas se pueden subclasificar en dos:

- Ígneas intrusivas, este tipo de rocas se enfrían debajo de la corteza terrestre por lo que su enfriamiento suele ser muy lento y a altas presiones.
- Ígneas extrusivas, este tipo de rocas se forma en el exterior de la corteza por lo que el enfriamiento es muy rápido y a baja presión.

Rocas metamórficas: el origen de esta roca es a partir de otra ya existente, pero su composición fisicoquímica cambia al tener un cambio de presión y temperatura.

Rocas sedimentarias: su formación es debido a la erosión de otra roca preexistente la cual se precipita y/o acumula y se compacta. Estas a su vez tienen una subclasificación:

- Sedimentarias detríticas: se originan por la acumulación mecánica de partículas minerales.
- Sedimentarias químicas: son aquellas que su formación es a través de uniones químicas de los elementos que la componen.

Pero también pueden ser clasificadas para uso ingenieril pero esta clasificación se torna a un más compleja puesto que deben de tenerse en cuenta sus propiedades con el fin de tomarla en cuenta

para los cálculos de diseño (Vallejo *et al.*, 2004), una clasificación que se ha realizado es de acuerdo con resistencia a la compresión simple tabla 1:

Tabla 1 Clasificación de las rocas a partir de su resistencia a compresión simple (Vallejo et al., 2004)

Resistencia a la compresión simple (MPa)	ISRM (1981)	Geological society of London (1970)	Bieniawski (1973)	Ejemplo
<1	Suelos			
1-5	Muy blanda	Blanda (>1.25)	Muy baja	Sal, lutita, limolita, marga, toba, carbón
5-12.5	Blanda	Moderadamente blanda		
12.5-25		Moderadamente dura		
25-50	Moderadamente dura	Moderadamente dura	Baja	Esquisto, pizarra
50-100	Dura	Dura	Media	Mármol, granito, gneiss, arenisca
100-200	Muy dura	Muy dura	Alta	Caliza, dolomía
>200		Extremadamente dura	Extremadamente dura	Muy alta
>250				

2.2. Construcción de lumbreras en suelos blandos.

En la ciudad de México se emplea una gran diversidad de procesos constructivos para la construcción de lumbreras como son: la lumbrera flotada, los anillos prefabricados, los muros Milán. Sin embargo, debido a las características de función y geometría que comprenden una lumbrera, el procedimiento constructivo se determinará de acuerdo a las condiciones geotécnicas del terreno, las cuales por tratarse de suelos blandos como los son las arcilla de la Cuenca del Valle de México, se deberán de tomar en cuenta las propiedades mecánicas del suelo, así como las presiones de poro presentes para satisfacer las condiciones de estabilidad general y local, durante y posterior a la construcción.

2.2.1. Lumbrera flotada

El procedimiento de lumbrera flota fue desarrollada en el año de 1969 por los ingenieros Jorge Cravioto y Abel Villareal quienes patentaron este método para la construcción de lumbreras en las arcillas blandas de la Cuenca del Valle de México. El cual por sus características constructivas garantiza la estabilidad de las paredes y del fondo de la excavación (Zemva *et al.*, 2011).

- a) El procedimiento consiste en la construcción de dos brocales poligonales o circulares con forma de "L" invertida, que servirán como guía para la excavación de una zanja empleando una almeja guiada hasta el nivel de desplante de la losa de fondo; llenado la zanja con lodo bentonítico para la estabilización del material.
- b) Posteriormente se realiza la demolición del brocal interior y se comienza la excavación del núcleo hasta alcanzar el nivel de desplante con almeja libre; sustituyendo el material excavado con lodo bentonítico el cual logrará la estabilización de la excavación, es importante mantener los niveles y las características de diseño (densidad, viscosidad y contenido de arena) a fin de prevenir cualquier inestabilidad de terreno. Una vez concluida la excavación se limpia el fondo de los azolves con ayuda de un succionador de aire (air lift) que incluso enrasa y nivela la superficie de la excavación; o alternativamente se emplea la almeja libre.
- c) Se construye el tanque de flotación metálico reforzado internamente y descubierto en su cara inferior, con un diámetro ligeramente mayor al exterior de la propia lumbrera que presenta además una serie de tuberías colocadas al centro del tanque y cuatro líneas distribuidas en su perímetro, con el fin de manejar los respectivos procesos de inmersión a través de la inclusión y desalojo del aire en el interior, lo que motiva que sea hermético en todas sus uniones soldadas.

d) Se coloca el tanque sobre la superficie del lodo, debiendo estar sujeto por viguetas metálicas apoyadas sobre el brocal en forma radial en las cuales se ajustan contra el tanque de flotación (vigas de atraque). Se comienza a construir la estructura definitiva de la lumbrera sobre el tanque metálico, conformada por un cilindro de concreto cerrado en el fondo mediante una losa, al ser concluida esta etapa se procede a inyectar aire al tanque de flotación para retirar la carga de las viguetas metálicas de esta manera el tanque queda flotando. Mediante el control de volumen de aire se hace descender el tramo colado controlado por malacates que permiten su ajuste en caso de ser necesario para continuar con el cimbrado y colado de la siguiente etapa, este proceso se repite hasta alcanzar el nivel establecido.

Durante el ciclo de colados e inmersiones se alcanza una altura en la que el empuje de flotación es mayor que el peso del conjunto ya construido, por lo que ya no es posible sumergirla por lo cual llega es necesario colocar un lastre adicional en el interior de la lumbrera con agua o lodo.

e) Al llegar al nivel de proyecto se procede a ligar la lumbrera con el brocal exterior mediante trabes de concreto para adicionar el peso del brocal a la lumbrera. Como el diámetro de la excavación es mayor al de la lumbrera, se tiene un espacio que debe ser rellenado con mortero desde la superficie a través de tuberías tremie, con el fin de confinar y aportar resistencia a la flotación de la estructura.

f) Una vez alcanzada la resistencia del relleno se procede a desalojar el lastre que se colocó en el proceso de inmersión, para la construcción del revestimiento definitivo de la lumbrera.

2.2.2. Anillos prefabricados o Método Convencional.

El método de anillos prefabricados se ha ocupado en diversas ocasiones para la construcción de lumbreras en suelos blandos donde la resistencia al esfuerzo cortante es muy baja y permiten grandes deformaciones (IMCyC, 2002).

La construcción de lumbreras con anillos prefabricados se ha ocupado para la construcción de diversas lumbreras en suelos blandos donde la resistencia al esfuerzo cortante es muy baja.

- a) El procedimiento consiste en la construcción de dos brocales circulares con forma de "L" invertida, que servirán como guía para la excavación de una zanja empleando una almeja guiada hasta el nivel de desplante, llenado la zanja con lodo bentonítico para la estabilización del material.
- b) Posteriormente se realiza la demolición del brocal interior y se comienza la excavación del núcleo hasta alcanzar el nivel de desplante con almeja libre, sustituyendo el material excavado con lodo bentonítico el cual logrará la estabilización general y local de la excavación, es importante mantener los niveles y las características de diseño del lodo bentonítico (densidad, viscosidad y contenido de arena) a fin de prevenir cualquier inestabilidad de terreno.
- c) Una vez terminada la excavación se deben tener ya construido el primer anillo. Este anillo se hará descender a la lumbrera el cual deberá de contar con 4 vigas radiales en el interior, que servirán de liga para la losa de fondo y también funcionarán como acero de refuerzo. En el brocal estarán fijadas 4 vigas-guía que serán utilizadas para mantener al primer anillo 30 cm por encima del fondo de la excavación; al ser colada la losa de fondo primaria con tubería tremie el concreto ocupa el espacio que se encuentra en la pared de la excavación.

- d) Una vez que el concreto alcanza la resistencia de la losa de fondo, las cuatro vigas-guía son utilizadas para bajar el resto de los anillos prefabricados que cuentan con 4 pares de orejas en la parte exterior, para que cada par de orejas coincida con las vigas-guía descansando sobre la losa de fondo.
- e) Al terminar la colocación de los anillos el espacio que se encuentra entre la pared de la excavación y la pared exterior de los anillos es rellena con mortero, asegurando de esta manera la continuidad del suelo y la estructura; una vez alcanzada cierta resistencia del mortero se procede a retirar el lodo que inunda el núcleo de la lumbrera.
- f) Finalmente se procede a limpiar las paredes de la lumbrera para construir el revestimiento definitivo (losa y muro) empleando cimbra deslizante.

2.2.3. Muro Milán

Este proceso es usualmente usado en cimentaciones, cuando se tiene poco espacio para maniobras en el predio donde se construirá; pero su aplicación en la ingeniería son muchas, partiendo de que su función principal es la contención de empujes verticales en excavaciones de cualquier tipo (TGC Geotecnia, 1985).

- a) El procedimiento consiste en la construcción de dos brocales poligonales con forma de "L" invertida, que servirán como guía para la excavación de una zanja empleando una almeja guiada hasta el nivel de desplante de la losa de fondo; llenado la zanja con lodo bentonítico para la estabilización del material. La secuencia que se debe de seguir en este método es de realizar las excavaciones de manera alternada, esto con el fin de garantizar la verticalidad de la excavación.

- b) Cuando se termina la excavación de la zanja, se deben de colocar las juntas de colado, las cuales tiene la función de cimbra que dejará la forma de machihembrado para los colados subsecuentes.
- c) Al tener lista las juntas se proceden a colocar el acero de refuerzo en el proceso de izaje, se deben de tener especial cuidado ya que este puede sufrir deformaciones en el acero, este izaje se realiza con grúa hidráulica en la cual tendrá un balancín con el objeto de tener varios puntos de amarre de la parrilla. El acero debe anclarse en la parte superior con barras de acero sujetas en los brocales con el fin de evitar la flotación del acero durante el colado. Se tendrá especial cuidado en el centrado del acero para garantizar el recubrimiento mínimo especificado en el proyecto con rodillos de concreto u otro tipo de calzas.
- d) Una vez colocado todo el acero de refuerzo se comienza el colado con tubería tremie. Se recomienda obtener testigos de fraguado de cada olla que se vacíe y cuidar el tiempo en que presente su fraguado inicial. En este momento se podrá mover ligeramente la junta para despegarla, repitiendo esta operación hasta que el concreto tenga auto-soporte y sean retiradas las juntas.
- e) Al alcanzar el concreto la resistencia de diseño, se procede a construir la trabe de coronamiento la cual tiene la función de unir estructuralmente todos los muros. Este proceso comienza con el descabece de los muros continuando con habilitado del acero propio de la trabe y termina con su colado.
- f) Al terminar los trabajos de la construcción de la trabe de coronamiento se da comienzo a la excavación del núcleo, demoliendo el brocal interior y continuando la excavación hasta el nivel que el proyecto indica la construcción de una trabe de liga o anillo de rigidez que ayudará a rigidizar la parte inferior de los muros.

- g) La segunda etapa de excavación se realiza hasta el nivel de desplante de proyecto para la construcción de la losa de fondo.
- h) Finalmente se construye el revestimiento definitivo de la lumbrera. Llegado al nivel máximo de excavación, se construirá el muro secundario (concreto reforzado), el cual se integrará al muro de concreto lanzado y marcos metálicos, a través de los conectores de cortante. Deberá preverse el ajuste al acero de refuerzo del cuerpo de la lumbrera en la zona de conexión con el túnel, así como la construcción del anillo de emportalamiento. La construcción del muro secundario será con cimbra deslizante, por lo que en obra deberá definir el tipo de cimbra deslizante más adecuado, previendo las preparaciones para sujeción que pudieran requerirse. El proceso de construcción de muro secundario consiste en una secuencia de etapas de habilitado de acero de refuerzo, colocación de cimbra y colado, en forma ascendente desde el fondo de la lumbrera y hasta alcanzar el nivel de la trabe de liga. Finalmente se construirá la losa de fondo. Los últimos 15 cm de excavación, aproximadamente, se deberán afinar con herramienta manual, para posteriormente colocar un firme de concreto pobre de aproximadamente 5 cm de espesor, previo al colado de la losa.

3. BASES DE DISEÑO

3.1. Generalidades

1. Para el desarrollo del análisis geotécnico se adoptará el Sistema Internacional de Unidades, SI.
2. En la primera etapa del diseño se generará el Modelo Geotécnico de Análisis para cada lumbrera que corresponderá con los resultados de los trabajos de exploración, instrumentación y ensayos de laboratorio.
3. El Modelo Geotécnico deberá contener la siguiente información de los suelos encontrados a lo largo de la profundidad explorada: Clasificación de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), valores de las propiedades índice, y magnitudes de las propiedades mecánicas.
4. Las condiciones hidráulicas del sitio de cada lumbrera se determinarán de acuerdo con las lecturas realizadas por la instrumentación instalada en el sitio.
5. En el análisis geotécnico se considerará la presencia de una sobrecarga, debida al peso del equipo de construcción sobre el área de influencia de la lumbrera.
6. El diseño geotécnico de la lumbrera deberá contemplar, cuando menos, los siguientes análisis:
 - Diagrama de esfuerzos geostáticos e hidráulicos del sitio.
 - Análisis de estabilidad de la zanja para el muro Milán con lodo bentonítico, cumpliendo con un factor de seguridad mínimo de acuerdo con las normas aplicables al momento de su construcción.
 - Análisis de la estabilidad de la zanja considerando la presión ejercida por el concreto del muro Milán sobre las paredes de la excavación, cumpliendo con

un factor de seguridad mínimo de acuerdo con las normas aplicables al momento de su construcción.

- Análisis de falla por empotramiento de la pata del muro Milán, cumpliendo con un factor de seguridad mínimo de acuerdo con las normas aplicables al momento de su construcción.
- Análisis de falla general por el fondo, cumpliendo con un factor de seguridad mínimo de acuerdo con las normas aplicables al momento de su construcción.
- Cálculo de los empujes laterales actuantes en la estructura.
- Revisión de la flotación final de la lumbrera, cumpliendo con un factor de seguridad mínimo de acuerdo con las normas aplicables al momento de su construcción.
- Análisis de falla del fondo por subpresión, cumpliendo con un factor de seguridad mínimo de acuerdo con las normas aplicables al momento de su construcción.
- Análisis del comportamiento bajo el efecto de fricción negativa, cumpliendo con un factor de seguridad mínimo de acuerdo con las normas aplicables al momento de su construcción.
- Diseño del sistema de abatimiento de la presión de poro.

3.2. Uso y ubicación

La lumbrera en estudio se plantea como una estructura de servicio, esto es, que servirá como vía de ingreso y salida de los equipos auxiliares que se utilizarán para la construcción del túnel, además de la extracción del material de rezaga. Se ubicará en la Ciudad de México en la zona III, donde los depósitos de arcilla tienen una profundidad de 50 m intercalada con lentes de arena.

3.3. Descripción geométrica

Por las dimensiones de los materiales y equipos que se introducirán o retirarán a través de las lumbreras de servicio, se requiere que ésta cuente con 12.0 m de diámetro libre mínimo desde el contacto con el túnel hasta la superficie.

Por la naturaleza de los suelos del sitio, el procedimiento de construcción la lumbrera se plantea mediante un muro Milán de 1.0 m de espesor y con tableros de 3.0 m de longitud, llevado algunos metros por debajo del lecho inferior de la losa de fondo, hasta lograr el empotramiento que el análisis geotécnico indique, a unos 35 m de profundidad. Entre los tableros del muro se colocarán juntas planas metálicas con diseño específico del constructor, que deberán permitir el contacto adecuado entre tableros y reducir las posibles filtraciones.

3.4. Consideraciones del diseño

3.4.1. Consideraciones de normas y referencias aplicables

Para la ejecución del diseño geotécnico-estructural de las lumbreras se empleará el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal y sus Normas Técnicas Complementarias.

En aquellos casos no cubiertos por el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal y sus Normas Técnicas Complementarias se podrá considerar, el uso de los siguientes Reglamentos, Códigos, Manuales y Referencias, todos en su versión última:

- American Concrete Institute, ACI; los comités aplicables.
- American Institute of Steel Construction, Inc., AISC.
- American Society for Testing and Materials, ASTM.
- American Welding Society, AWS.
- American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO.

- Manual de Construcción de acero. Instituto Mexicano de la Construcción en Acero A.C., IMCA.
- Manual de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación S.C., ONNCCE.
- Normas Técnicas para Levantamientos Geodésicos. Diario Oficial de la Federación
- COVITUR (1987). Manual de Diseño Geotécnico. Vol 1. Departamento del Distrito Federal. Secretaría General de Obras y Servicios. México D.F.

3.4.2. Consideraciones geológicas

De acuerdo con la estratificación general de la Cuenca del Valle de México propuesta por Raúl J. Marsal y Marcos Mazari (1959) obtenida a lo largo de diversos estudios geotécnicos y geofísicos para la solución de cimentaciones, obtuvieron la siguiente secuencia: una costra superficial cuyo espesor varía de 1 a 7 m, una formación arcillosa superior cuyo espesor varía de 25 hasta 50 m intercalada con algunos lentes de arena, una capa dura cuyo espesor ronda los 5 m, una formación de arcilla inferior cuyo espesor ronda los 15 m y los depósitos profundos.

3.4.3. Modelo geotécnico

A partir de la interpretación de los sondeos realizados en el sitio y a los ensayos de laboratorio realizados a las muestras que se obtuvieron se puede concluir un modelo geotécnico como el siguiente.

A. Relleno. De 0.0 a 1.00 m; formado por arenas, gravas y fragmentos de tabique.

B. Costra Superficial. De 1.00 a 4.20 m. Compuesta por suelos limo arcillosos con presencia de arena fina, de tonos café y gris. La resistencia promedio a la prueba de penetración Estándar (N_{SPT}) resultó de 9 golpes y en el cono eléctrico (q_c) varió de 3 a 32 kg/cm².

C. Primera serie arcillosa. De 4.20 a 20.80 m:

C1. Arcilla blanda. Substrato de 6 m de espesor, se trata de una arcilla limosa con poca arena, formando una estructura del suelo de alta compresibilidad. La resistencia de los estratos arcillosos medida con el sondeo de penetración estándar (N_{SPT}) varió desde peso propio de la herramienta a 13 golpes por la presencia de lentes de arena, y con el sondeo de cono eléctrico (q_c) varió desde 5 a 34 kg/cm² en el lente de arena.

C2. Arcilla blanda. Substrato de 10.60 m de espesor, se trata de una arcilla limosa con arena color gris con tonos café verdoso y gris de consistencia baja a media; donde la resistencia registrada en el sondeo de penetración estándar osciló entre peso propio de la herramienta y 22 golpes por la presencia de arena.

D. Depósitos cruzados. De 20.80 a 27.40 m, son depósitos cementados formados por estratos de arcilla, arena limosa y limo arenoso, color café y gris de consistencia media a dura con el sondeo de penetración estándar (N_{SPT}) vario de 40 a 61 golpes.

E. Arcilla de consistencia media a dura. De 27.40 a 36.4 m; se trata de una arcilla de alta plasticidad, de consistencia media a dura, con resistencia a la penetración del cono eléctrico (q_c) de 1,300 kPa en promedio.

F. Limos y arenas limosas. De 36.4 a 42.4 m; intercalaciones de limos y arenas limosas, de compactidad media a muy compactas, con número de golpes de penetración estándar (N_{SPT}), de 23 hasta más de 50 para 5 centímetros en promedio de hincado del penetrómetro.

G. Limos. De 42.4 a 46.7 m; limos de alta plasticidad, consistencia blanda a dura, en donde el valor del sondeo de penetración estándar (N_{SPT}) fue en promedio de 24 golpes.

H. Limos y cenizas. De 46.4 m hasta el final de la profundidad explorada, a 50.5 m existen intercalaciones de limos de baja resistencia, con valores del sondeo de penetración estándar (N_{SPT}) en promedio de 6 golpes.

3.5. Diseño geotécnico

El proyecto geotécnico de la lumbrera, consideró las características mecánicas y las propiedades índices de los materiales existentes en el lugar donde se ubicará la lumbrera.

De acuerdo con el flujo de trabajo convencional para este tipo de proyectos, se deben atender los resultados y las recomendaciones del estudio de ingeniería básica y los estudios complementarios que realizó el contratista.

3.5.1. Estabilidad de zanja para Muro Milán

La estabilidad de la zanja por excavar al construir el muro Milán se revisa bajo dos condiciones: cuando esté llena con lodo bentonítico y cuando se realice la colocación del concreto.

3.5.1.1. Análisis de estabilidad de zanja para muro Milán con lodo

El análisis de estabilidad de la zanja para el muro Milán durante la excavación, consiste en confirmar que la densidad del lodo sea la adecuada con el fin de que la presión que ejerza la

columna de lodo bentonítico sobre las paredes de la excavación impida que se genere la superficie de falla. se deberá cumplir la siguiente condición:

$$\text{Resistencia confinada del suelo, } \sigma_1 > \text{Esfuerzo efectivo vertical del suelo, } \sigma'_3$$

La resistencia confinada del suelo se calcula con la siguiente expresión:

$$\sigma_1 = \sigma_3 \tan^2\left(45^\circ + \frac{\phi}{2}\right) + 2c \tan\left(45^\circ + \frac{\phi}{2}\right) \quad (1)$$

donde:

c resistencia al corte no drenado medio del estrato representativo.

σ_3 esfuerzo efectivo del lodo bentonítico (para la revisión de la zanja con concreto corresponde al esfuerzo efectivo vertical del suelo).

3.5.1.2. Análisis de estabilidad de zanja para muro Milán con concreto

La introducción de concreto fresco en la zanja cambia la presión lateral ejercida contra la pared; la nueva presión es mayor que la presión hidrostática ejercida por el lodo bentonítico, por lo que se deberá revisar la siguiente condición:

$$\text{Presión efectiva del concreto, } \sigma_c < \text{Resistencia confinada del suelo, } \sigma_1$$

3.5.2. Empujes horizontales.

Presiones de diseño durante la construcción. Para determinar las presiones que el suelo ejercerá sobre el revestimiento, se calcularon la magnitud y la distribución de los empujes laterales con base en las siguientes ecuaciones (Tamez *et al.*, 1987):

$$P_{az} = K_a \times (\gamma * z - u_z + q_s) - 2c * \sqrt{K_a} + u_z \quad (2)$$

$$K_a = \frac{1}{N_\phi} = \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\phi}{2} \right) \quad (3)$$

$$p_{rm} = \frac{E_a}{D} \quad (4)$$

p_{az} presión horizontal activa a la profundidad z

K_a coeficiente de presión horizontal para la condición activa de Rankine

ϕ ángulo de fricción interna del suelo

c cohesión del suelo

γ peso volumétrico del suelo

z profundidad de análisis

q_s sobrecarga en la superficie, se considera un valor de 30 kPa

u_z presión de poro, durante la construcción, a la profundidad z

E_a empuje de diseño (área del diagrama de presión horizontal) en un espesor igual a D por arriba del fondo de la excavación.

Se estima que, la presión de diseño podría ser del orden del empuje activo para suelos arcillosos de comportamiento elastoplástico; las presiones negativas que se producen en el suelo no se transmiten al muro, por tanto, las presiones de cálculo incluyen solamente la zona de compresión. Con los resultados de los cálculos se dibujan los diagramas de la presión activa, así como la redistribución de presiones que definen la envolvente de diseño para el revestimiento primario.

Presiones de diseño para el revestimiento definitivo. Para calcular este diagrama de presión lateral se utiliza la ecuación 5, con un coeficiente de empuje de tierras en reposo $K_0 = 0.5$.

$$P_{oz} = K_0 \times (\gamma * z - u_z + q_s) + u_z \quad (5)$$

3.5.3. Tipos de fallas

3.5.3.1. Falla general de fondo

El mecanismo de falla de fondo en excavaciones profundas ademadas, en suelos blandos, se manifiesta como un levantamiento brusco del fondo simultáneamente con el hundimiento repentino de la superficie del terreno lindante a la excavación y, por último, el colapso de la estructura que soporta el empuje lateral (Tamez *et al.*, 2001).

Para la lumbrera se considera que el mecanismo se forma por un prisma rectangular de suelo que descansa sobre un mecanismo de capacidad de carga (semejante al de Prandtl) para una zapata de longitud infinita, desplantada en un depósito de arcilla saturada y homogénea; cuando la zapata tiende a deslizar hacia el interior de la excavación, bajo la acción del peso del prisma rectangular, se desarrolla una reacción vertical ascendente igual a la capacidad de carga de la zapata, así como una fuerza cortante, que se opone al deslizamiento del prisma, figura 2.

q_s sobrecarga en la superficie

Para una lumbrera se tiene $B=L=D$, diámetro de la excavación; asimismo, deben considerarse los siguientes valores máximos:

$$\frac{H}{B} \leq 2.5 \quad \text{y} \quad \frac{B}{L} \leq 1.0$$

Revisando las condiciones estratigráficas del sitio donde se construirá la lumbrera se determina que el mecanismo de falla planteado en la ecuación 6 sólo se desarrollará en los estratos por debajo del desplante de la lumbrera, por lo que el factor H/B se considera nulo y el término $B/L = 1.0$.

3.5.3.2. Falla por flotación

La falla por flotación, fenómeno que se puede presentar durante la vida útil de la estructura, se caracteriza por la emersión de la lumbrera respecto a la superficie del terreno debido al empuje por subpresión en el fondo de la estructura.

Una vez que se diseñe el revestimiento definitivo de la lumbrera, se revisará que el peso total de la lumbrera más un efecto de adherencia por fricción entre las paredes de la estructura y el suelo, sea mayor que la fuerza de subpresión en la base, utilizando la expresión 7 (COVITUR,1997).

$$FS_f = \frac{\text{Peso total de la lumbrera} + \text{Adherencia}}{\text{Fuerza de subpresión en la base}} = \frac{W_{Lumbrera} + A_{paredes-suelo}}{U_{Base}} \quad (7)$$

La variación de la adherencia con la profundidad, s_{0z} , se estima en función de los esfuerzos efectivos verticales con la siguiente ecuación (Zeevaert *et al.*, 1983):

$$S_{0z} = K_{\phi c} * \sigma_z \quad (8)$$

De donde la adherencia media se calcula como:

$$\bar{\sigma}_0 = \frac{K_\phi * \int \sigma_0 * dz}{H_{m\acute{a}x}} \quad (9)$$

donde:

K_ϕ coeficiente de fricción lateral igual a 0.3

$H_{m\acute{a}x}$ profundidad máxima de excavación de la lumbrera

$\int \sigma_0 dz$ área del diagrama de esfuerzos verticales efectivos en la masa de suelo

Condiciones sísmicas. En este caso se considera que el efecto de adherencia podría perderse por desplazamientos relativos entre el fuste de la lumbrera y el suelo circundante.

3.5.3.3. Falla por subpresión

El factor de seguridad para falla por subpresión se determina comparando la presión total del suelo y la presión del agua a la profundidad donde se detectan estratos permeables (figura 3); cuando la excavación es susceptible de presentar este mecanismo de falla, es indispensable abatir la presión piezométrica en los estratos permeables.

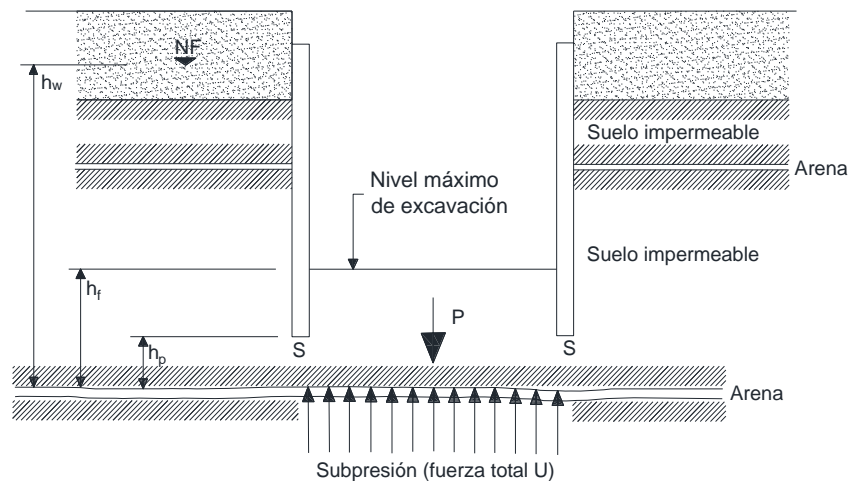


Figura 3 Mecanismo de falla por subpresión (Tamez et al., 2001)

$$FS = \frac{\gamma * h_f}{u_z} \quad (11)$$

donde:

γ peso volumétrico del suelo susceptible de falla por subpresión

h espesor del estrato de suelo bajo el fondo de la excavación susceptible de falla por subpresión

u_z presión piezométrica del estrato permeable

Para los diferentes estratos permeables que se identificaron en el sitio de la lumbrera, se determina la profundidad mínima de abatimiento, para prevenir una falla por subpresión con un factor de seguridad mínimo de 1.8.

γ_f Peso volumétrico del suelo entre el fondo de la excavación y el estrato permeable en revisión

h_f Espesor de suelo desde el fondo de la excavación al estrato permeable para FS=1

Considerando un efecto tridimensional, la ecuación (12) se modifica de la siguiente manera:

$$FS = \frac{\gamma * h_f + \frac{F_L}{A}}{U_z} \quad (12)$$

Donde F_L corresponde a la fuerza de fricción lateral total que se desarrolla entre el fondo de la excavación y el estrato permeable; para un FS = 1.3, se estima el valor mínimo de F_L requerido para que se cumpla la condición y despejando de la ecuación (13):

$$F_L = (FS * U_z - \gamma * h_f) * A \quad (13)$$

3.5.4. Análisis de estabilidad.

3.5.4.1. Falla por pateo

El mecanismo de falla se produce cuando se vence la resistencia pasiva del suelo frente al muro; se considera que, en el último nivel de apuntalamiento, colocado en cada etapa de excavación, se genera una articulación plástica; el factor de seguridad se evalúa con la expresión (14) y será igual o mayor a 1.5 (Tamez *et al.*, 1987):

$$FS_p = \frac{c * L * r + W * l + M_p}{p * \frac{h_p^2}{2}} \quad (14)$$

donde:

c resistencia al corte no drenada media a lo largo de la superficie de falla

L longitud de la superficie de falla

r radio de la superficie de falla

W peso saturado del suelo dentro de los límites de la superficie de falla

l distancia del paño del muro al centro de gravedad del suelo resistente

M_p momento flexionante resistente del muro de contención, obtenido del diseño estructural preliminar

p presión promedio sobre muro

h_p longitud del muro entre el último nivel de apuntalamiento y el nivel de desplante del muro.

3.5.4.2. Comportamiento de la lumbrera sujeta a fricción negativa

En caso de que el abatimiento piezométrico afecte los estratos superficiales podría generarse fricción negativa sobre el fuste de la lumbrera. Considerando que los materiales deformables se localizan hasta 36.4 m de profundidad, la fricción negativa a desarrollarse se calcula con la siguiente ecuación (Zeevaert *et al.*, 1983):

$$FN = \pi D \cdot K_{\phi} \cdot \int \sigma_0 \cdot dz_i \quad (15)$$

donde:

FN fricción negativa sobre la lumbrera

D diámetro exterior de la lumbrera

K_{ϕ} coeficiente de empuje a largo plazo del estrato i , $K_{\phi} \approx 0.3$

$\int \sigma_0 dz_i$ área del diagrama de esfuerzos verticales efectivos (para abatimiento total) en la masa de suelo.

3.4.5.3. Análisis a la salida del escudo

El análisis de estabilidad de la conexión de la lumbrera hacia el túnel se realiza revisando la estabilidad del frente de la excavación de sección circular resultante de demoler el revestimiento de la lumbrera para permitir el paso de la tuneladora; aplicando las ecuaciones 16 a 21; (Tamez *et al.*, 1997).

$$FS = \frac{2 \cdot s_{m2} \cdot \frac{Z_d}{A} \cdot (1 + \sqrt{K_p}) + 2.7 \cdot c_1 \cdot \sqrt{K_p}}{\frac{\gamma_1 \cdot A}{3} + \gamma_2 \cdot H + q_s + \Delta q_s} \quad (16)$$

donde:

$$S_{m2} = K_f \cdot c_2 + 0.5 \cdot [\gamma_2 \cdot (H - Z_d) + q] \cdot \operatorname{tg} \phi_2 \quad (17)$$

$$K_f = \frac{1 - \operatorname{sen}^2 \phi_2}{1 + \operatorname{sen}^2 \phi_2} \quad (18)$$

$$q = 2.7 \cdot c_1 \cdot \sqrt{K_p} - 0.5 \cdot \gamma_1 \cdot A \quad (19)$$

$$K_p = \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ + \frac{\phi_1}{2} \right) \quad (20)$$

Z_d altura de descarga

c_1, c_2 cohesión del suelo en los prismas 1 y 2, respectivamente

γ_1, γ_2 peso volumétrico del suelo en los prismas 1 y 2, respectivamente

ϕ_1, ϕ_2 ángulo de fricción interna del suelo en los prismas 1 y 2, respectivamente

A avance sin soporte

H profundidad de análisis

q_s sobrecarga en la superficie

Δq_s incremento de la sobrecarga debido al revestimiento

S_{m2} resistencia media en las caras del prisma 2

q capacidad de carga neta del prisma 1 (valor límite $q = \gamma \cdot H$)

K_f factor de fricción

K_p coeficiente de empuje pasivo

En las ecuaciones anteriores se considera A =Diámetro del túnel, la expresión del factor de seguridad para un túnel profundo en suelos puramente cohesivos se simplifica como sigue:

$$FS = \frac{4 \cdot \frac{z_d}{D} \cdot c_2 + 2.7c_1}{\frac{\gamma_1 \cdot D}{3} + \gamma_2 \cdot H + q_s} \quad (21)$$

3.6. Diseño estructural de Muro Milán

3.6.1. Generalidades

1. El diseño estructural tomará en cuenta los lineamientos establecidos y se utilizará la nomenclatura de las fórmulas del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal y sus Normas Técnicas Complementarias vigentes, considerando el criterio de estado límite de falla, y estado límite de servicio.
2. El análisis estructural deberá considerar las siguientes acciones:
 - Peso propio de la estructura; se considerará la geometría de la lumbrera tomando en cuenta sus elementos estructurales, tales como: Losa de Fondo, Muro de acompañamiento, Brocales temporales y definitivos.
 - Empuje lateral del agua contenida en la masa de suelo (empuje hidráulico); resultado del análisis geotécnico.
 - Empuje lateral del suelo; se considerarán los empujes actuantes en la estructura de retención: los activos para diseño de revestimiento primario, los de reposo para el revestimiento definitivo; valores resultado del diseño geotécnico.

- Carga de Subpresión; se considerará el empuje del agua contenida en la masa de suelo al nivel de desplante de la lumbrera para el diseño de la losa de fondo; resultado del análisis geotécnico.
 - Sobrecarga; se considerará la presencia de una sobrecarga, q, el valor considerado para la sobrecarga estará en función del peso de los equipos de construcción actuantes, a nivel de brocales, en el área de influencia de la lumbrera.
 - Fricción negativa; se considerará la carga a largo plazo debida a la fricción negativa provocada por asentamiento regional.
3. De acuerdo con las Normas Técnicas Complementarias, el análisis estructural deberá considerar las siguientes combinaciones de carga

- **Combinación No.1**

$$(CM+ET+EH+CV+FN) *F.C$$

Se deberá considerar un FC aplicable de acuerdo con el reglamento de construcción vigente

- **Combinación No.2**

$$(CM+ET+EH+100\% \text{ Sismo Longitudinal}+30\% \text{ Sismo Transversal}) *F.C$$

4. La resistencia a flexión de un elemento de concreto reforzado se determinará con la expresión 22:

$$M_R = F_R b d^2 f' c q (1 - 0.5q) \quad (22)$$

5. El área mínima de refuerzo en tensión por flexión se determinará con la expresión:

$$A_{S_{\min}} = \frac{0.7\sqrt{f'_c}}{f_y} bd \quad (23)$$

no es necesario que el refuerzo mínimo sea mayor que 1.33 veces el requerido por análisis.

6. La resistencia a fuerza cortante de los elementos anchos de concreto reforzado como losas y muros, se determinará con la expresión 24 que se muestra a continuación:

$$V_{cR} = 0.5F_R bd \sqrt{f'_c} \quad (24)$$

7. Si la sección de concreto no tuvo la capacidad de resistir toda la fuerza cortante, el excedente se tomará con acero de refuerzo adicional calculado con la expresión:

$$A_v = \frac{V_u - V_{cR}}{F_R f_y \text{sen} \alpha} \quad (25)$$

Pero sin que el cortante máximo último sea mayor a: $V_u = 2.5 F_R bd \sqrt{f'_c}$ en el caso de vigas;

$V_u \leq 2 F_R bd \sqrt{f'_c}$ para columnas; y $V_u \leq 1.5 F_R bd \sqrt{f'_c}$ en casos donde la fuerza cortante sea tomada por un solo estribo o un grupo de barras paralelas.

8. Para elementos sujetos a cargas de flexocompresión, el diseño se realizará a partir de la elaboración de los diagramas de interacción correspondientes.
9. El área de acero de refuerzo por cambios volumétricos no será menor de $A_{scv} = 0.003 bh$ y se distribuirá en dos lechos.
10. Los materiales contemplados en el diseño estructural deberán cumplir con las Normas Oficiales Mexicanas, NOM, que el Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, SC, ONNCCE emite.
11. Se deberán considerar las siguientes propiedades de materiales:

- Se propondrá que el concreto estructural clase 1 tendrá un peso volumétrico en estado fresco superior a 2.2 t/m³ (22 kN/m³);
- Los concretos clase 1 tendrán una resistencia, $f'c$, igual o mayor que 350 kg/cm² (35MPa). La resistencia especificada de los concretos clase 2 podrá ser inferior a 250 kg/cm² (25 MPa) pero no menor que 200 kg/cm² (20 MPa).
- Para concretos clase 1, el módulo de elasticidad, E_c , se determinará con las expresiones:

$$E_c = 14000 \sqrt{f'c}, \text{ en } \frac{kg}{cm^2} \quad (26)$$

$$E_c = 4400 \sqrt{f'c}, \text{ en MPa} \quad (27)$$

- Para concretos clase 2, el módulo de elasticidad, E_c , se determinará con las expresiones:

$$E_c = 8000 \sqrt{f'_c}, \text{ en } kg/cm^2 \quad (31)$$

$$E_c = 2500 \sqrt{f'_c}, \text{ en Mpa} \quad (32)$$

- El concreto clase 1 se fabricará con agregados gruesos con peso específico superior a 2.6 y el concreto clase 2 con agregados gruesos con peso específico superior a 2.3.
- El agua de mezclado deberá ser limpia y cumplir con los requisitos de la norma NMX-C-122.
- Para el diseño de los Brocales provisional y definitivo, trabe de liga, muro de revestimiento y losa de fondo debe considerarse concreto estructural clase 1:
- Cemento resistente a los sulfatos (CPO 30R RS), donde se deberá cumplir:
 - Expansión por ataque a sulfatos menor al 0.1%.

- Relación agua cemento menor o igual a 0.45.
 - Contenido de cemento (kg/m^3) mayor o igual a 370.
 - Acero estructural A-36, $f_y=2530 \text{ kg/cm}^2$.
- Para el muro Milán y revestimientos definitivos el cemento a utilizarse se propone de tipo CPC 40R RS y deberá cumplir con la norma NMX-C-414-ONNCCE; en la elaboración del concreto la relación agua cemento será de 0.45.
 - El acero de refuerzo del muro Milán tendrá un $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$, será corrugado y cumplirá con las normas NMX-B-6, NMX-B-294 ó NMX-B-457.
 - Por fines de durabilidad se considerará un recubrimiento libre de 7.5 cm.
 - El valor de la relación de Poisson, ν , del concreto será de 0.15.

3.6.2. Brocales

Los brocales para la construcción de los muros Milán son elementos estructurales temporales desechados después de la obra, usados como guía para construcción del muro y como elemento de soporte de los armados durante la etapa de colado.

De acuerdo con los resultados de los estudios de suelo realizados, se deberá de confirmar si la superficie se tiene la capacidad de carga necesaria para que las banquetas de los brocales no requieran estar ligadas a la estructura vertical del elemento, sin embargo para garantizar el trabajo estructural del conjunto, las banquetas se diseñarán empotradas en los brocales; se considerarán en el análisis que los brocales podrían colarse en dos etapas, en la primera se construye la sección vertical del brocal y en la segunda, se construye la banqueta.

El brocal se diseñará con sección rectangular y no con sección tipo L, considerando que en el análisis del brocal como sección tipo L se tienen esfuerzos menores en los elementos estructurales,

y que con el diseño de la sección como rectangular, se obtienen factores de seguridad estructural mayores en los brocales.

El análisis del brocal se llevará a cabo considerando que estructuralmente se tenían dos anillos de forma poligonal, con continuidad en todas sus secciones, con 7 lados en el brocal exterior y 14 lados en el brocal interior; la longitud de los lados del polígono exterior resultó en promedio de 7.03 m y en el polígono interior 2.64 m en promedio, las cargas se consideraron con distribución uniforme y perpendiculares a cada uno de los lados de la poligonal que forma el anillo.

Las principales condiciones de carga que rigen el diseño de los brocales, son las presiones inducidas por el suelo sumadas a las presiones que induce la sobrecarga en la banqueta del brocal, actuando en las áreas laterales de las placas que integran estos elementos estructurales; la forma geométrica del polígono induce las flexiones y cortantes máximos de diseño en los muros de los brocales, y el efecto de “anillo” que se tiene transversal en la lumbrera, induce los esfuerzos axiales de compresión y tensión máximos que se tienen en los elementos estructurales.

En el brocal interior la presión interior induce esfuerzos de flexión, cortantes y tensión axial, y en el brocal exterior, la presión exterior produce esfuerzos de flexión, cortantes y compresión axial.

La sección transversal vertical diseñada en concreto para los brocales interno y externo de la lumbrera, será de (35x150 cm) y (50 x150 cm) respectivamente.

Se tomará en cuenta también en el proyecto de los brocales, que el porcentaje mínimo necesario para los cambios de temperatura que se tienen en los concretos fuera 0.003, y que el porcentaje mínimo de acero para flexión en los anillos fuera el reglamentario.

La sección y los parámetros para el diseño de los brocales serán los siguientes:

Normatividad Reglamento de Construcciones vigente a la fecha en el D.F.

- Sección transversal, 150 cm de ancho y 50 cm de peralte, brocal exterior.
- Sección transversal, 150 cm de ancho y 35 cm de peralte, brocal interior.
- Resistencia nominal del concreto a los 28 días de edad, 250 kg/cm².
- Factores reductivos, 0.9 para flexión, 0.80 para cortante y torsión y 0.7 para compresión y aplastamiento.
- Factores de carga, 1.5 para las condiciones de cargas estáticas y 1.1 para la combinación más desfavorable de las cargas estáticas y las cargas dinámicas.
- Módulo de elasticidad del concreto, 221,359 kg/cm²
- Esfuerzo cortante permisible en la sección de concreto sin acero de refuerzo transversal, 6.12 kg/cm² como valor máximo y 3.75 kg/cm² como valor mínimo.
- Esfuerzo cortante máximo en la sección de concreto reforzada transversalmente, 28.28 kg/cm².
- Acero de refuerzo, corrugado con límite elástico mínimo igual a 4,200 kg/cm²
- Módulo de elasticidad del acero de refuerzo, 2,039,000 kg/cm²

4. PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO

4.1. Plataforma de trabajo

Al comienzo de la construcción se deberá de construir una plataforma de trabajo de 20 cm de espesor con material de banco compuesto por una mezcla de tezontle y grava en una proporción de 30:70, compactada al 95 % de la prueba Próctor Estándar, esta plataforma permitirá una distribución uniforme de las cargas en la superficie, esta debe de comenzar a partir del paño exterior del trazo del muro.

4.2. Brocales

La construcción de los brocales es de manera temporal, puesto que solo servirá como guía para la construcción del muro y como elemento de soporte de los armados durante la etapa de colado.

4.2.1. Excavación para la construcción de brocales

El inicio de la construcción de los brocales comienza con el trazo y nivelación del terreno natural en toda el área de la lumbrera, incluyendo la zona del alero del brocal exterior definitivo.

Mediante equipo mecánico y manual, se procede a realizar la excavación y nivelación de toda el área de la lumbrera, incluyendo el área del alero del brocal exterior definitivo más un área adicional que servirá para el movimiento de los equipos de construcción, hasta el nivel superior del brocal del muro Milán.

Una vez concluida la etapa anterior descrita se procede a la excavación del alero 35 cm profundidad de desplante de esta parte del brocal, para posteriormente excavar la zanja que alojara al faldón cuya profundidad de desplante es de 1.50 m.

4.2.2. Construcción del brocal temporal

Al haber concluido la excavación de las zanjas que ocupara el brocal se procede a realizar el armado con el acero previamente habilitado, de acuerdo con los planos de proyecto, prestando especial cuidado en colocar los separadores para poder garantizar el recubrimiento especificado dichos separadores no podrán ser por ningún motivo de material permeable o que pueda oxidarse. Los dobleces de varillas se harán en frío de acuerdo a la tabla de doblez establecida.

Se colocará la cimbra común para el colado del brocal (colando contra la pared de la excavación) y se verifica su alineamiento, de acuerdo con los planos de proyecto.

Se realizará el colado del concreto hidráulico clase 1 estructural, cuyas propiedades están descritas en la sección 3.6.1 de este documento, con revenimiento 14 cm +/-2 cm, compactando el concreto mediante vibrado. En todas las aristas se harán chaflanes de 2 x 2 cm.

El tiempo mínimo de descimbrado en condiciones medias de temperatura y curado normal será de 36 |h y la construcción de una etapa siguiente podrá iniciarse inmediatamente. Este tiempo puede reducirse a la mitad cuando se emplea concreto de resistencia rápida o acelerante de fraguado. No existe limitación para la longitud máxima a construir.

4.3. Tableros de muro Milán

4.3.1. Excavación de tableros de muro Milán

Una vez concluido el brocal se procede a enumerar los tableros que conformaran al muro Milán con la finalidad de llevar el control del avance, así como para realizar la planeación del ataque de los mismos.

La construcción de las pantallas se realizará de acuerdo a los planos los cuales determinarán el número de módulos que la constituirán, la longitud de estos módulos estará definida por las características del terreno, generalmente son del orden de 2.60 m a 2.80 m que corresponden al ancho de la cuchara.

La excavación de los tableros se realizará con una almeja operada hidráulicamente fijada a una barra metálica deslizante llamada Kelly.

Se deberá de sustituir el material excavado con una suspensión de lodo bentonítico para garantizar la estabilidad de las paredes de la zanja.

Se cuidará la verticalidad de la perforación, en caso de observarse una desviación mayor del 5 % con respecto a la vertical (la desviación total como diseño del espesor del muro es de 1.0%), se interrumpirá el avance de la perforación y se tomarán las medidas posibles para corregir la desviación observada. Para garantizar el alineamiento de la excavación del tablero con la perforación previa, se habilita un escantillón sobre la estructura de la almeja. Las características geométricas del escantillón estarán en función del equipo a utilizar. La verificación de la verticalidad de la excavación se hará mediante plomeo de la excavación.

4.3.2. Sustitución de suelos por lodo bentonítico.

Al realizarse la excavación de la zanja el suelo extraído debe sustituirse con lodo bentonítico para que las paredes permanezcan estables hasta que pueda realizarse el colado del muro. Durante toda la construcción de los módulos se deberá prestar cuidado de que el nivel del lodo no se encuentre por debajo a lo mucho 0.5 m con respecto al nivel del brocal.

Este lodo se realizará en obra a base de agua y bentonita por lo que la cantidad de lodo bentonítico debe estar siempre disponible contemplando el proceso para su fabricación, el cual debe ser hidratado por lo menos 24 h mediante una planta con mezclador del tipo coloidal (MAT SKC-15 o similar) que genere lodos con la misma calidad y densidad mínima de 1.07 ton/m^3 y contenido de arena no mayor a 5%.

Debido a que las características como la viscosidad, densidad, cake, PH y contenido de arena del lodo definen la estabilidad de la zanja, estas deben ser controladas por medio de un laboratorio el cual garantizará los siguientes parámetros:

Puesto que una parte del lodo puede ser recuperable se tendrá que reciclar con algún tratamiento que puede ser por los siguientes tres medios:

- Mecánico: por desarenación en un equipo de tipo Caviem de capacidad mínima de $100 \text{ m}^3/\text{h}$.
- Químico: por adición de bicarbonato de sodio en caso de contaminación de PH básico debido al concreto.
- Por adición: de agentes defloculantes en caso de contaminación por las arcillas.

El sobrante de lodo que no se recicle se deberá de llevar a tiraderos autorizados por medio de camiones cisterna, puesto que se clasifica como un material altamente contaminante debido a su impermeabilidad.

Después de la sustitución por lodo bentonítico se procede a limpiar con el equipo de perforación el fondo de un panel con el propósito de prepararlo para el colado. De esta manera todos los

depósitos de tamaño grande que se pueden encontrar en el fondo de la excavación, así como todas las partículas medianas en el lodo ya depositadas se extraen rápidamente.

4.3.3. Introducción de juntas planas

Posteriormente a la perforación y la limpieza de lodo bentonítico se colocarán las juntas metálicas. Las cuales son piezas metálicas que constan de un cuerpo tubular de sección rectangular, de ancho igual al muro Milán, que sirve de cimbra y dan una forma machihembrada entre muros. Esta parte es trapezoidal y tiene un pequeño canal para alojar una banda de PVC usada como sello entre tablero y tablero asegurando la estanqueidad entre ellos.

Las juntas (en tramos de 12 m a 24 m), se bajan por tramos, por medio de una grúa y se mantiene suspendida en los brocales. Su posición está definida con tolerancia de ± 5 cm por la marca de extremidad de panel sobre el brocal.

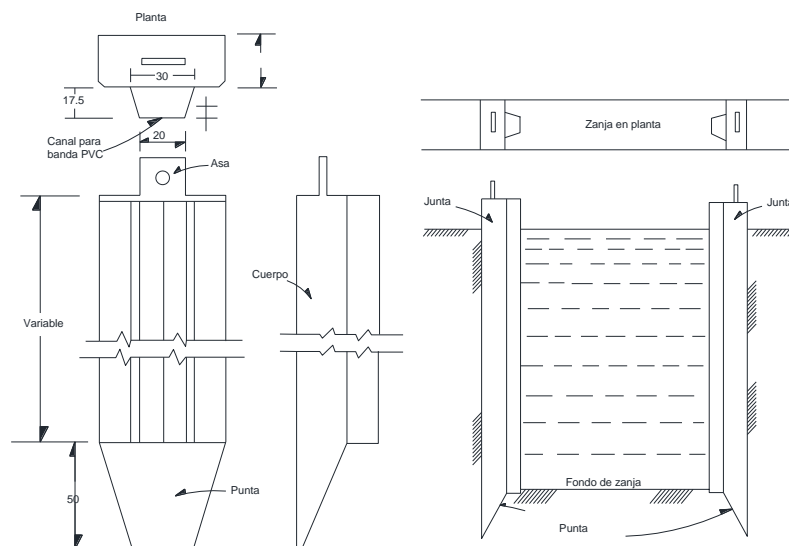


Figura 4 Juntas metálica machihembrada de muro Milán (Tamez et al., 2001)

Previo al bajado de la junta metálica CWS, se adhieren a esta firmemente los tacones de poliestireno de alta densidad mediante alambre recocido (mínimo un amarre por tacón) a todo lo largo de la junta metálica y finalmente se cubre todos los tacones con malla gallinero. Cada tacón de poliestireno tiene forma de triangular de 1.0 m de largo por 0.50 m de altura y una profundidad de 0.50 m. Los tacones de poliestireno son bajados en forma conjunta con la junta metálica en una sola pieza o unidad.

A la mayor brevedad posible se regresará para perforar la posición que se encuentra en el panel secundario o mixto adyacente al panel ya colado. En caso de que el concreto rodee la junta, se necesitará utilizar después de la perforación de la pila un trepano que permitirá romper este concreto y así descimbrar la junta.

Para que se garantice el contacto entre muros es necesario que antes de descimbrar se limpie el panel adyacente.

Las juntas metálicas en ningún momento se apoyarán en el fondo de la excavación, por lo cual la junta será suspendida o colgada desde los brocales. Este elemento de junta tiene la misión de fijar el límite del módulo y crear en el concreto a colocar una superficie de contacto adecuada para la correcta unión al concreto del siguiente módulo.

4.3.4. Armado de muro Milán

Cuando se concluya la etapa anterior se procede a la colocación del acero de refuerzo de los tableros, este debe de ser habilitado previamente de acuerdo a los planos del proyecto, sobre superficies planas ya sea en plantillas de concreto o madera.

De acuerdo con los planos de proyecto el armado debe soportar adecuadamente la manipulación para su izaje, evitando que sufra pandeos y dobleces, también se debe de contemplar durante el habilitado la colocación de centradores (rodillos o patines) con el objetivo de garantizar el recubrimiento del acero y elementos de izado (asas, rigidizadores) para manipular y posicionar la armadura.

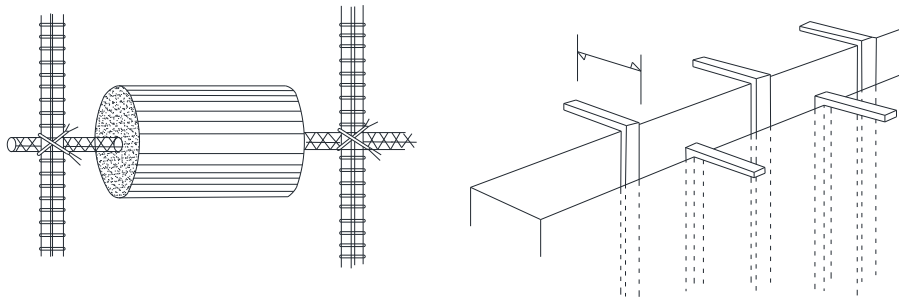


Figura 5 Centradores (SMIG, 2002)

El izaje se realizará en tres tramos de 12 m aproximadamente, en el primer tramo se deberá de colocar una tira de poliestireno de alta densidad (22 kg/m^3) de 2.50 m de altura con el fin de anclar la losa de fondo uniendo el acero de refuerzo de la losa con el de los muros.

Para el izado de los tramos se deberá de colocar el balancín que se enganchará en las asas, o el primer cerco maestro reforzado. La grúa utilizada deberá de tener la capacidad y longitud suficiente para soportar todas las maniobras las cuales son el levantarla, transportarla y colocarla. Si al levantar la armadura se corre el riesgo de flexionarla se puede ocupar un cable auxiliar al centro de la armadura.

Una vez que este finalizando la colocación del primer tramo del acero de refuerzo se deben de tener las precauciones necesarias para tener listos el mecanismo de sostenimiento sobre los

brocales de la lumbrera para sostener y estabilizar este primer tramo de armado, y poder continuar con el segundo tramo teniendo las precauciones ya descritas para su izaje.

Una vez izada la segunda parte del armado se sostendrá con la grúa verticalmente para poder realizar la conexión con la primera parte del armado mediante conectores mecánicos roscados al 50% de traslape, terminada las conexiones se continuará a seguir descendiendo el armado dentro de la excavación y repitiendo esta secuencia para colocar el tercer armado.

La armadura de acero se deberá de quedar sujeta de los brocales 20 cm por encima del fondo de la excavación.

Para descenso de la armadura usar siempre el automotor. No frenar en seco en el descenso de la carga, ya que puede ser causa de caídas o de roturas de la pluma.

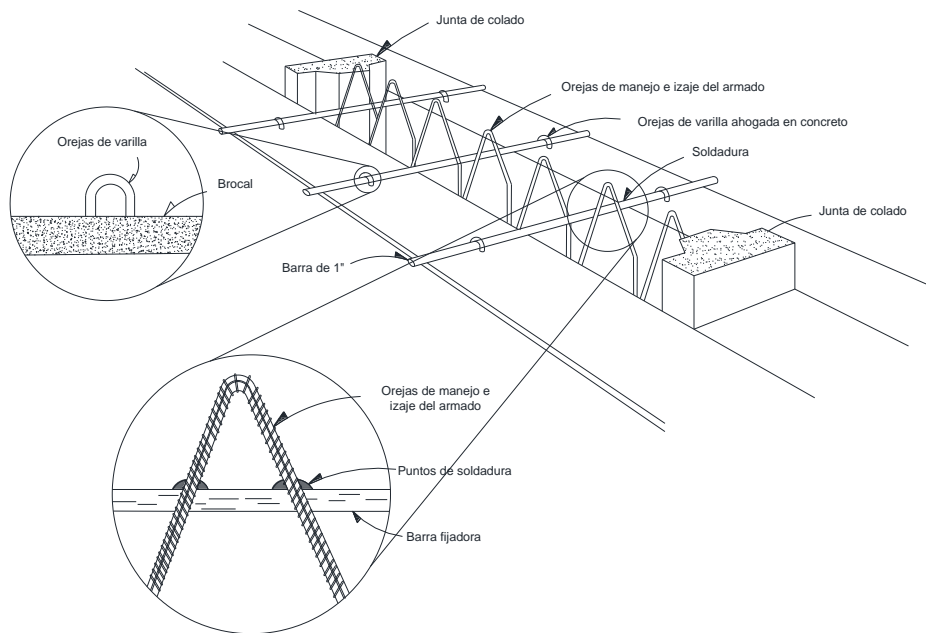


Figura 6 Orejas de fijación del acero de refuerzo (SMIG, 2002)

4.3.5. Aspectos a considerar en el izado del armado

Antes del izado de las armaduras se deberán de revisar las capacidades de las grúas que realizarán el trabajo así como la zona de trabajo de ésta (rampas y líneas eléctricas) para evitar contratiempos.

Se deberán diseñar los balancines o vigas de reparto para un buen manejo de la armadura.

Se tendrá en cuenta las dimensiones, peso y orientación durante el armado e izaje de la armadura para evitar movimientos innecesarios que pudieran provocar deformaciones permanentes a la armadura.

Durante el izaje se debe de tener cuidado con las líneas de alta tensión que de acuerdo con la normatividad la distancia mínima es de 3 m hasta 57,000 volts y de 5 m mayor a 57,000 volts.

Tras la introducción de la armadura del acero de refuerzo se procederá a la preparación para el colado de concreto. Se verificarán topográficamente la alineación del tablero.

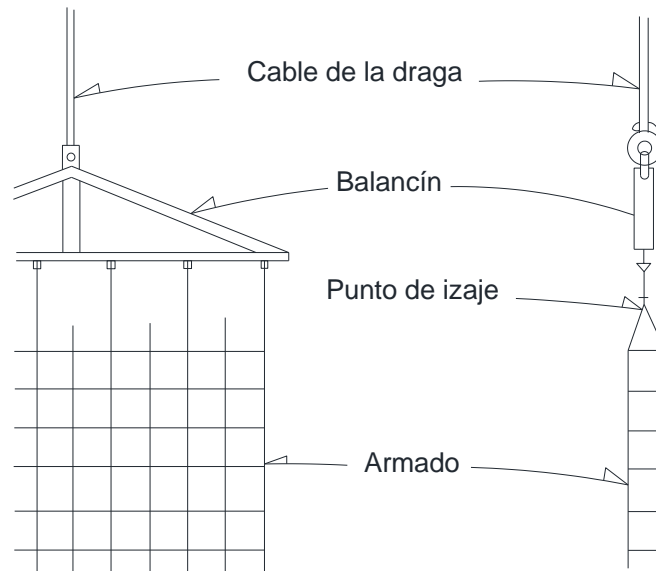


Figura 7 Empleo de balancín (SMIG, 2002)

4.3.6. Colado de muro Milán

El concreto debe ser tipo estructural, con resistencia a la compresión simple de 350 kg/cm² a los 28 días en muestras cilíndricas, usando para su composición cemento resistente a los sulfatos y como mínimo 375 kg de cemento por m³ de concreto y grava como agregado pétreo con un tamaño máximo de 3/4 de pulgada o 2 cm en su defecto y revenimiento de 18 cm +/- 2 cm. El peso volumétrico para el concreto simple es mayor a 2.20 t/m³. Se empleará una relación agua/cemento menor o igual que 0.50.

El diseño de mezcla de concreto tendrá la condición de que este sea autocompactable, también deberá de tenerse en cuenta el tiempo de colado por lo que se debe retrasar el fraguado inicial y la pérdida de revenimiento. Se preverá el empleo de aditivos retardantes, si se estima necesario en función del tiempo previsto de colocación. Si el aditivo se adiciona en obra se controlará el tiempo posterior de mezclado, en función de las instrucciones del suministrador. Bajo ningún concepto se alterarán en obra las características de dosificación del concreto.

El colado de los muros no puede hacerse en un tiempo mayor al de 36 h. Una vez terminada la zanja y el desarenado de los elementos.

Antes del momento del colado se debe de revisar las características del concreto suministrado como lo es que el concreto este en tiempo para su utilización, así como el revenimiento que ya mencionó y la extracción de muestras para las pruebas de laboratorio.

Se hace el colado con una tubería tremie bajo el lodo bentonítico. La operación de vaciado no debe ser interrumpida de manera notable esta debe hacerse en una sola operación. La tubería deberá de ser de 8", 10" o 12", (según se tenga espacio para el armado) en tramos de 1.0 m a 3.0 m de longitud con el fin de permitir recortar la tubería al momento en que el concreto va subiendo y por

presiones ya no es posible continuar el colado, las conexiones entre tramos de tubería deben ser herméticas para evitar la contaminación del concreto.

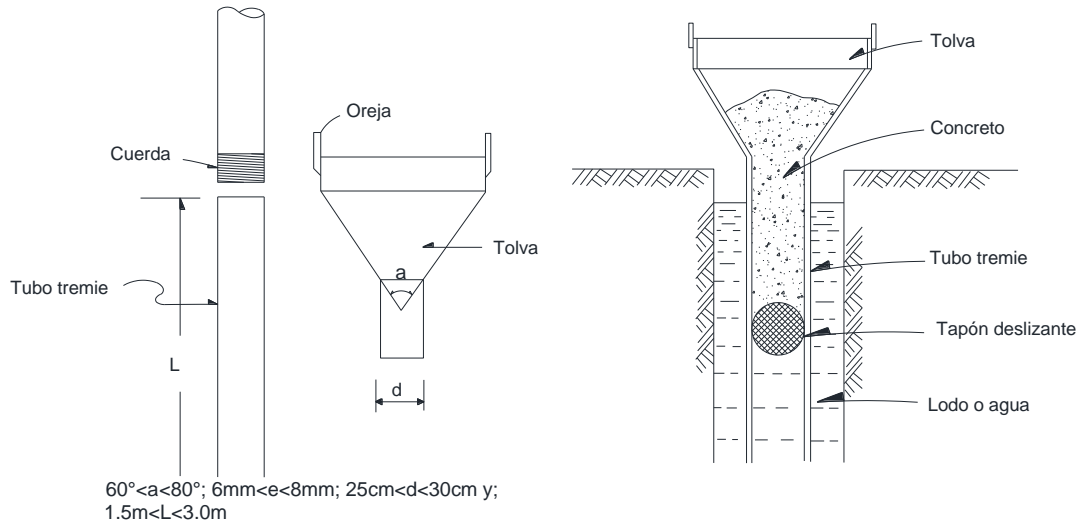


Figura 8 Tubería tremie (SMIG, 2002 & Tamez et al., 2001)

El proceso se inicia con la introducción y armado de las líneas de tubería, el tubo debe llegar hasta 20 cm o 30 cm por arriba del fondo de la excavación. Para evitar la contaminación del concreto con el lodo bentonítico, al inicio del colado se debe colocar una tapón (pelota) que separe el concreto del lodo, el tapón será empujado por el concreto desalojando del lodo de la tubería.

Se cuidará de no levantar la tubería de colado al comienzo del vertido, hasta no estar seguro de que la punta de la misma queda introducida un mínimo de 4 m dentro de la masa de concreto ya vertida, de tal manera de asegurar el desplazamiento del concreto que se encuentra en contacto con el lodo bentonítico y así evitar la contaminación del concreto. Durante el progreso del colado se ira recortando la tubería manteniendo siempre la distancia mínima sumergida en el concreto. Durante el colado se llevarán controles donde se registran los niveles alcanzados al vaciar cada olla revolvedora de concreto, con el fin de identificar las profundidades a las cuales se puede

presentar sobre-excavaciones o fisuras del terreno que puedan provocar fugas o pérdidas del lodo de perforación esto con la comparación de los volúmenes teóricos.

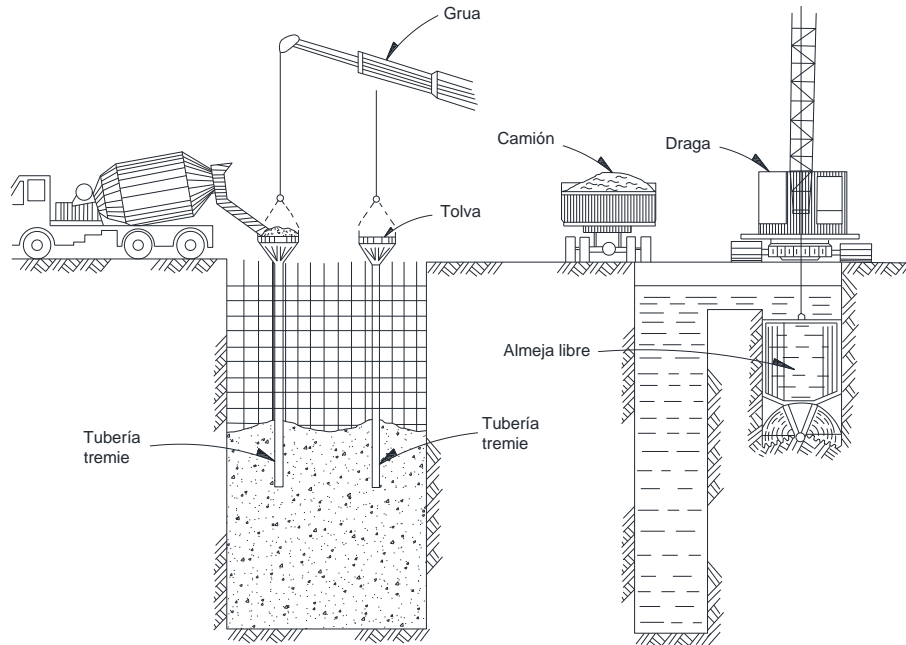


Figura 9 Secuencia de construcción (Tamez et al., 2001)

En el caso de dos tuberías se iniciará el colado con el vertido simultáneo de un camión revolver por cada tubería, después podrán verse camiones alternativamente por uno u otro tubo, cuidando de guardar siempre el necesario equilibrio.

El colado se terminará cuando el concreto alcance la cota de proyecto, contemplando el descabece para saneo, se deberá contar con un control de en las cotas próximas a los extremos de los módulos y tuberías.

El lodo bentonítico que se desplaza durante el colado del tablero es removido de la excavación con el auxilio de bombas de lodos, y dependiendo de sus características de calidad, se regenerarán y

reutilizarán (previa limpieza de los mismos si resulta necesario) o almacenarán en planta para su posterior reutilización o se enviarán al tiro oficial.

Una vez colado el tablero, se procede a la excavación del tablero siguiente de acuerdo con la secuencia determinada y cuidando siempre dejar entre excavaciones un tablero intermedio sin atacar. Para la construcción de los tableros intermedios se repetirá toda la secuencia indicada anteriormente.

4.3.7. Desmonte de juntas planas

La extracción de la junta se realizará una vez que se haya finalizado la perforación y limpieza del módulo adyacente o bien horas posteriores al colado cuando el concreto haya fraguado y se quede la forma de la junta, se extraerá con la grúa y el dispositivo con que cuente la almeja.

4.4. Mejoramiento del terreno (Jet Grouting)

Se deberán indicar los puntos en los cuales se realizarán las columnas. Para poder posicionar el equipo fijo necesario se necesitará un área en la que se puedan instalar los siguientes equipos:

- Bomba de inyección de alta presión.
- Planta de elaboración de lechadas.
- Silo de cemento para alimentación de la planta.
- Depósitos de agua.
- Mangueras de comunicación con el equipo de ejecución de Jet.

Resto de equipo auxiliar (taller, grupos de energía, bombas de limpieza, compresores, etc.)

El carro perforador estará equipado con una cabeza rotatoria el cual se desplazará sobre un mástil-guiadera con una longitud mínima para realizar columnas de 18 m.

Una vez indicado los puntos donde se colocarán las columnas e instalados los equipos fijos, se posicionará el carro perforador, el cual tiene la función de realizar la perforación y de realizar el Jet Grouting el cual se realizará con la misma herramienta de corte, esta ejecución se hará de forma automática.

La inyección se iniciará cuando la perforación haya logrado la profundidad de proyecto y se realizará de forma ascendente. La inyección se deberá de realizar de forma continua, para ello se debe de asegurar que la planta de mezclas sea de una capacidad adecuada.

Durante la inyección se debe de monitorear y controlar una serie de comportamientos para evitar fracturamiento hidráulico del terreno “clacage” que puede producir levantamientos en el terreno. Esto se produce cuando el caudal es alto y existe dificultad para el rechazo del taladro, se debe de tener especial cuidado en las inyecciones cercanas a la pantalla de la lumbrera puesto que puede causar desplazamientos de esta.

Durante la ejecución si no se llega a conseguir el rechazo durante 30 cm se deberá de alcanzar mediante maniobras con subida-bajada las veces que fuera necesario. En caso de que las maniobras fuesen suficientes se deberá realizar un solapamiento en la columna, que será por lo menos de 1 m de longitud, de lo contrario se detendrá la inyección y a continuación se pre-perforará 1.00 m de columna ya inyectada, y se procederá a continuar con la inyección, en el caso de volver a perder el rechazo y no conseguir recuperarlo se procederá a detener la inyección; y pasadas mínimo 24 horas se repetirá la columna.

Al concluir la inyección se rellenará el resto de la perforación estéril por gravedad con la misma lechada de cemento.

4.5. Trabe de coronamiento

La trabe de coronamiento se construye para unir estructuralmente todos los tableros del muro Milán en su parte superior, mediante el anclaje del acero del refuerzo de este elemento con el acero de refuerzo de los muros.

Antes de iniciar con el habilitado del hacer de la trabe de debe de realizar la limpieza del acero de los muros con un cepillo de alambre, con el objetivo de retirar el concreto existente en estas, de igual manera se debe de limpiar el lecho superior del muro, para eliminar impurezas y garantizar la adherencia entre el concreto de los tableros y el concreto de la trabe.

Posteriormente se procede al habilitado del acero, antes de realizar el colado se deberá de colocar un adhesivo para juntas fría con el fin de garantizar la continuidad de los concretos.

4.5. Excavación del núcleo de la Lumbrera.

La excavación del núcleo se realiza posteriormente a la construcción de la trabe de coronamiento.

La excavación del núcleo se realizará con una grúa Link-Belt LS-318 o similar y almeja loca de 1 1/2 yd³.

La excavación se realizará en avances controlados, en sectores y banqueos de tal forma que se garantice la estabilidad de la excavación del núcleo y también del terreno perimetral del terreno.

El monitoreo se deberá realizar mediante la instrumentación (piezómetros, extensómetros, inclinómetros, celdas de carga, etc.) que se instalarán de acuerdo con los planos de instrumentación

del proyecto, con el objetivo de monitorear, en todo momento, el estado de esfuerzos, deformaciones y condiciones de presiones hidráulicas del subsuelo antes, durante y posterior a la excavación.

Durante el proceso de excavación, se deberá contar con los camiones suficientes para realizar el retiro de la rezaga al tiro asignado.

Durante la excavación del núcleo se revisará que el muro o sus juntas no presenten filtraciones o que el concreto se encuentre segregado, de ser así se deberán de tratar estas imperfecciones con inyecciones a base de lechada (agua-cemento) o mortero (agua-cemento-arena). Las inyecciones se harán primeramente mediante perforación con una perforadora de pierna a un diámetro de 1 1/4" y profundidad de 60 cm. En seguida se colocará una boquilla de tubo negro de 1" de diámetro y 60 cm de longitud, con una válvula macho en sus extremos con la finalidad de poder conectar la manguera del equipo de inyección que en este caso puede ser una planta hanny-zmp725 o similar.

4.5.1. Excavación de núcleo en suelos duros

De acuerdo con las exploraciones geotécnicas se determina que durante la excavación del núcleo se excavará en suelo duro por lo que el procedimiento constructivo tendrá que ser cambiado.

Una vez que se encuentra la excavación en material duro se debe bajar una excavadora sobre orugas CAT 330 o similar con la cual se deberá de continuar la excavación del núcleo.

La excavación se realizará a media sección de la superficie de la lumbrera en banqueros de 1 m de profundidad. La rezaga se realizará mediante botes de 1 m³ de capacidad y grúa sobre oruga Link-Belt LS-318 o similar o de mayor capacidad.

El flujo de agua dentro de la lumbrera se controlará por medio de bombeo de achique por lo que se tendrá que hacer con equipo de bombeo tipo Wilden para recolección del agua a un cárcamo de bombeo, este equipo contara con una bomba sumergible que llevara al agua hasta la superficie.

Una vez llegada a la cota para la construcción de la losa, se realizará el afine del fondo con el objetivo de preparar la superficie para la construcción de la losa.

4.6. Anillo de rigidez.

De acuerdo a los planos estructurales del proyecto antes de rebasar la cota inferior del anillo de rigidez, se debe de comenzar con el escarificado del concreto de los muros con el propósito de exponer el acero de refuerzo vertical próximo a la cara de la excavación, para empezar los anclajes químicos HIT RE 500 o similar siguiendo las especificaciones del fabricante de acuerdo a los planos del proyecto, posteriormente se deberá colocar el resto del armado del anillo de rigidez y colocar el cimbrado para terminar con el colado del elemento.

4.7. Losa de fondo.

El afine del terreno se hará de forma manual 15 cm antes de finalizar la excavación. Posteriormente al afine del fondo de la excavación de deberá de colocar una plantilla de concreto pobre de $f'c=150 \text{ kg/cm}^2$ de 5 cm de espesor, previo al colado de la losa.

Una vez teniendo la superficie lista se procede a la colocación del acero de refuerzo previamente habilitado verificando los niveles topográficamente, para asegurar que se están cumpliendo con los requerimientos de los planos del proyecto, se tendrá cuidado con garantizar el recubrimiento con los separadores necesarios.

5. CONCLUSIONES

El procedimiento constructivo de lumbrera por muro Milán representa una excelente oportunidad para la construcción de este tipo de estructuras en terrenos blandos ya que garantiza la estabilidad de la excavación fungiendo el muro como tablestaca para posteriormente servir como elemento estructural definitivo y confiable.

Debido a la profundidad que presenta este tipo de lumbrera no es viable utilizar el método de lumbrera flotada puesto que se torna difícil el manejo del tanque de flotación, esto podría complicar toda la construcción o hasta el grado de perder la lumbrera.

Este método resulta muy conveniente al momento de realizar la excavación del núcleo al cielo abierto, pues al llegar a la profundidad donde se encuentran suelos firmes es necesario descender maquinaria para continuar con la excavación.

Durante el proceso constructivo se debe tener especial cuidado en garantizar la verticalidad de la zanja, puesto que si esta no cumple con los requerimientos se podría perder estabilidad del muro al cambiar los empujes a los que está diseñado.

Es importante una correcta planeación del colado del concreto puesto que al ser un elemento muy grande se deben evitar las juntas frías, lo que garantizaría la continuidad estructural del elemento.

Las juntas que dan una forma machiembrada y la correcta colocación del concreto dan al muro la estanqueidad necesaria sin la necesidad de colocar un revestimiento el cual aumentaría los costos.

Algunos inconvenientes que se puede presentar en este tipo de método son de un menor control en la calidad en la construcción de los muros, lo que implica la obtención de una sección estructural

con riesgo de contaminación, esto repercutiría en el aumento de costos y tiempo, puesto que se tendrían que tratar a través de inyecciones.

Aumento de los volúmenes de concreto en ciertas profundidades por la deformación del suelo, lo que llevaría a un aumento de costos.

6. PROPUESTA

Una propuesta alterna al método de muro Milán, es la construcción por el método mecanizado con VSM (Vertical Shaft Sinking Machine) con este tipo de maquinaria se puede excavar en suelos blando y firmes con o sin nivel freático.

Este método Consiste básicamente en una herramienta de corte rotatoria sujeta a un brazo telescópico y éste sujeto a un “brocal” que se apoya en superficie o en las paredes laterales de la lumbrera conforme va avanzando la excavación.

Para la estabilización se necesita inundar la lumbrera con lodo bentonítico, mientras que el material excavado se retira hidráulicamente con una bomba sumergible que lo conduce a la superficie a una planta de separación.

El anillo de concreto inferior de la estructura del eje, también denominado borde de corte está biselado y por lo tanto corta en el suelo circundante. Además, el corte excesivo del brazo debajo del filo del anillo en combinación con la lubricación con bentonita en la ranura anular reduce la fricción entre la pared del anillo y el suelo circundante.

El revestimiento se puede hacer en superficie por medio de concreto reforzado convencional y descenderlo conforme avanza la excavación (como sucediera con el método de flotación) o bien por medio de dovelas.

Las ventajas que ofrece este método son el poco espacio que requiere para su montaje y ejecución comparado con el método de muro Milán que necesita espacio para el habilitado de acero de los tableros.

El tiempo de ejecución se reduce considerablemente, puesto que el avance es continuo. Otra ventaja es que se controla la calidad de los elementos estructurales pues estos pueden ser prefabricados, garantizando la estanqueidad sin que se tenga que realizar un revestimiento secundario.

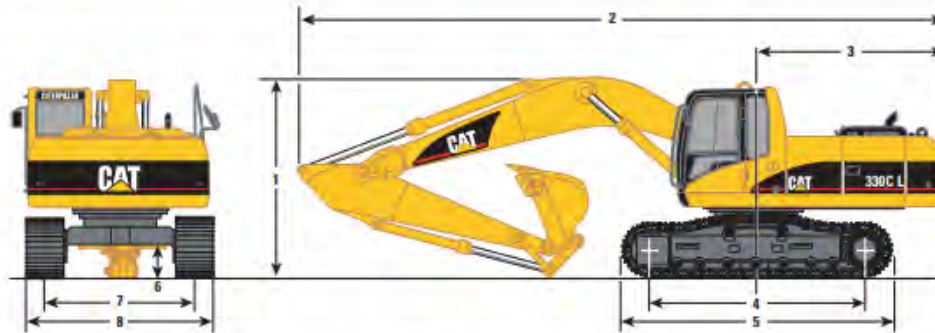
La desventaja de este método es el costo, la inversión se tendría que justificar contra el costo de otro método convencional.

7. ANEXOS

CAT 330C L

Dimensions

All dimensions are approximate.

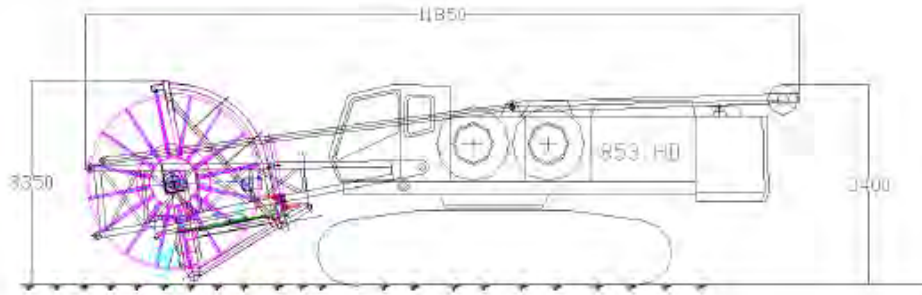


Boom Options	Reach — 6.5 m (21'4")	Reach — 6.5 m (21'4")	Mass — 6.18 m (20'3")
Stick Options	R3.9D m (12'10")	R3.2D m (10'6")	M2.55E (8'4")
1 Shipping height	3630 mm (11'11")	3350 mm (11'0")	3490 mm (11'5")
2 Shipping length	11 190 mm (36'9")	11 140 mm (36'7")	10 840 mm (35'7")
3 Tail swing radius	3500 mm (11'6")	3500 mm (11'6")	3500 mm (11'6")
4 Length to centers of rollers	4040 mm (13'3")	4040 mm (13'3")	4040 mm (13'3")
5 Track length	5020 mm (16'6")	5020 mm (16'6")	5020 mm (16'6")
6 Ground clearance	510 mm (1'8")	510 mm (1'8")	510 mm (1'8")
7 Track gauge	2590 mm (8'6")	2590 mm (8'6")	2590 mm (8'6")
8 Shipping width with 850 mm (34") Shoes	3440 mm (11'3")	3440 mm (11'3")	3440 mm (11'3")
Operating Weight			
750 mm (30") Shoes	34 382 kg (75,800 lb)	34 252 kg (75,513 lb)	34 462 kg (75,976 lb)
850 mm (34") Shoes	35 108 kg (77,400 lb)	34 978 kg (77,113 lb)	35 188 kg (77,576 lb)

* R3.9 shipping height increases to 3700 mm (12'2") with medium pressure and/or drain auxiliary lines.

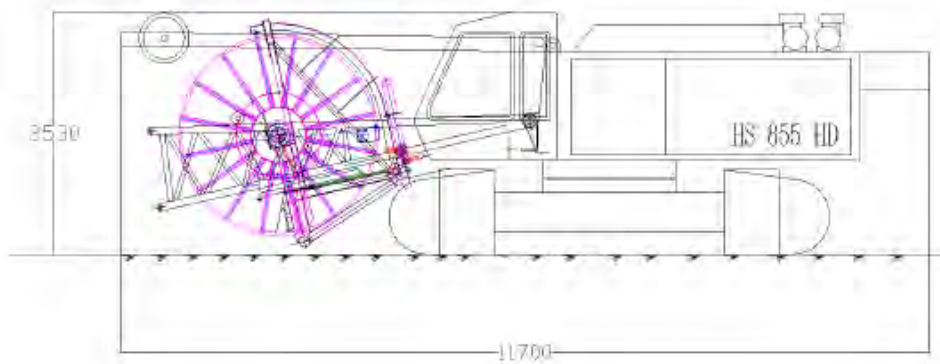
1.5. Overall dimensions

1.5.1. CRANES carrier with boom base and cable drum (transport configuration)



Weight = 52 tons

Figure 1.2 LIEBHERR 853 HD carrier with boom base and cable drum



Weight = 62.2 tons

Figure 1.3– LIEBHERR 855 HD carrier with boom base and cable drum

1.5.2. Boom head + Kelly guide

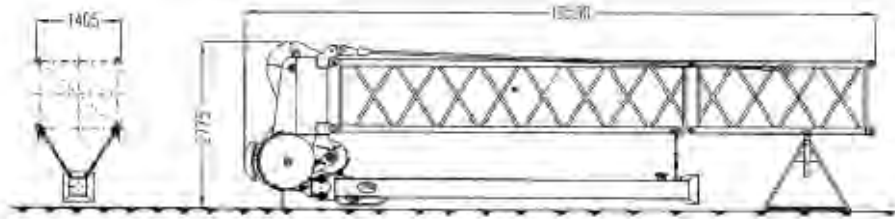
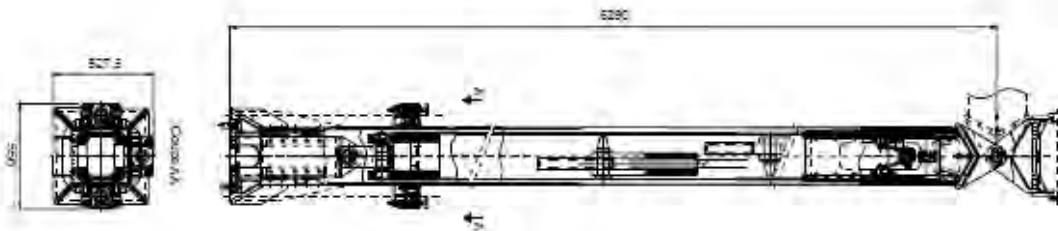


Figure 1.5 – Boom head + Kelly guide

CARRIER	WEIGHT
LBH HS 853 HD	4500 kg
LBH HS 855 HD	5000 kg
LBH HS 872 HD	5350 kg

1.5.3. Kelly



Weight = 1360 kg

Figure 1.6 – Kelly

1.5.4. Hydraulic grab

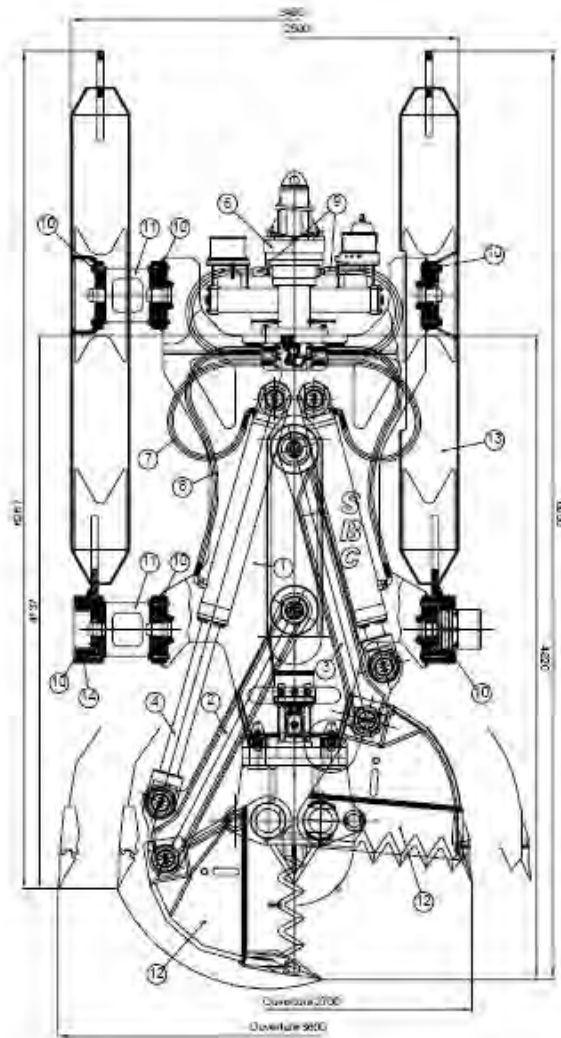


Figure 1.7 – Hydraulic grab

Weight of the grab body (without guides and ladle) : 7400 kg

Total weight of the grab = grab body + ladle + 2x Guide

Guides

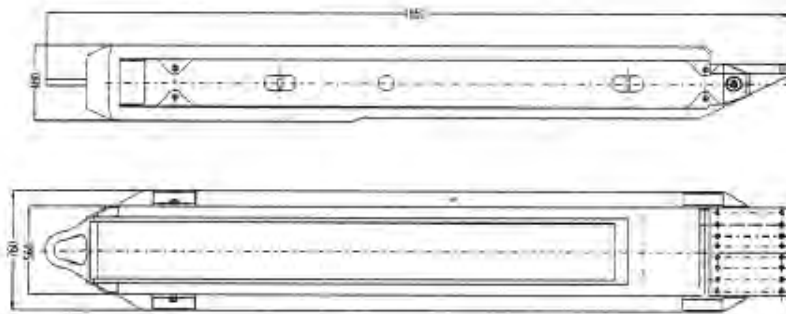


Figure 1.8 – Guide

GUIDE SIZE	WEIGHT
600	1000 kg
800	1200 kg
1000	1400 kg

15.5. Ladles

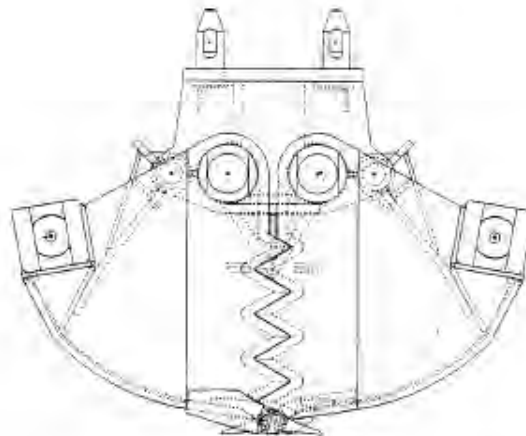
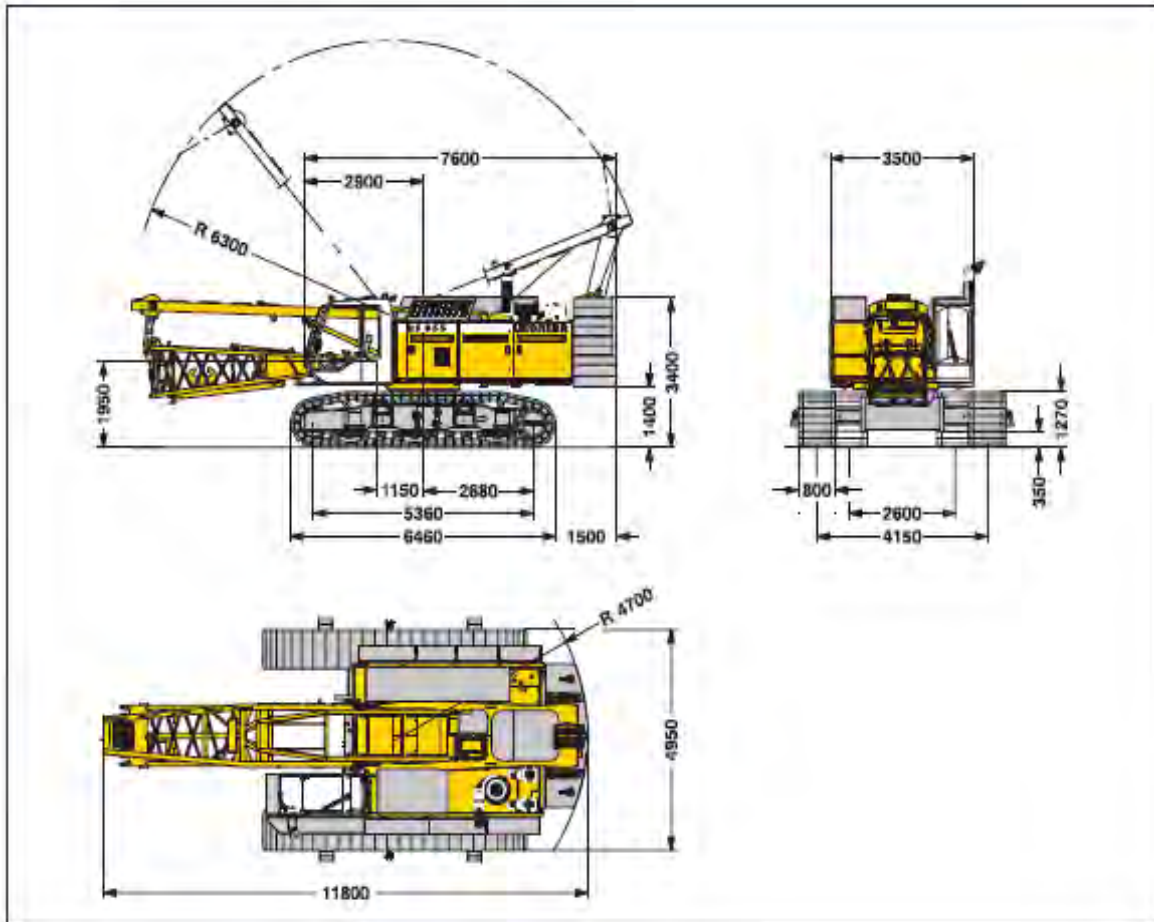


Figure 1.9 – Ladle

LADDLE SIZE	WEIGHT
600X2700	3470 kg
800X2700	4120 kg
914X2700	4500 kg
914X3200	4900 kg
762X3200	4450 kg

Dimensiones

Máquina base con chasis inferior



8. BIBLIOGRAFÍA

- Bowles, J. E. (1988). *Foundation Analysis and Design* (4ª ed.): McGraw-Hill Book.
- COVITUR. (1987). *Manual de Diseño Geotécnico*. México: Departamento del Distrito Federal. Secretaría General de Obras.
- Das, B. M. (2014). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*. California: Thomson Learning.
- Das, B. M. (2014). *Fundamentos de Ingeniería de Cimentaciones* (7ª ed.): Cengage Learning.
- Juárez, E., & Rico, A. (1979). *Mecánica de Suelos. Tomo 1. Fundamentos de la Mecánica de Suelos*. México: Noriega Limusa.
- Juárez, E., & Rico, A. (1980). *Mecánica de Suelos. Tomo 2. Teoría y Aplicaciones de la Mecánica de Suelos*. -, México: Noriega Limusa.
- SMMS. (2002). *Manual de Construcción Geotécnica I*. México: Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos.
- Tamez, E. (2001). *Ingeniería de Cimentaciones. Conceptos Básicos de la Práctica*. México: Tgc.
- Tamez, E. (1997). *Diseño Geotécnico de Túneles*. México: Tgc.
- Simón, A. (2004). *Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal*. México: Trillas.
- Simón, A. (2004). Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones, *Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal* (pp. 815-860). México: Trillas.
- Cravioto, J. L. (s.f.). *Las lumbreras flotadas del Drenaje Profundo*.
- Cravioto, J. L. (s.f.). *Construcción de Lumbreras con anillos prefabricados*.
- Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica. (1991). *Análisis y procedimiento constructivos de lumbreras del Sistema de Drenaje Profundo de la ciudad de México*.
- Auvinet, G., Juárez, M., & Sánchez, R. (2014). *Instrumentación en obras geotécnicas*.
- Auvinet, G., Méndez, E., Juárez, M., & Rodríguez, J. F. *Riesgos Geotécnicos para la Construcción de Vivienda en el Valle de México*.
- García, J. L. (2013). *Construcción y activación del Tramo I del Túnel Emisor Oriente*.
- Ramírez, C. A. (2012). *Diseño Geotécnico de la Lumbrera 04 del Túnel Emisor Oriente*.

Zemva, S. (2011). *Diseño y Construcción de Lumbreras en Suelos Blandos por el Procedimiento de los anillos Prefabricados*.

Rodríguez, I. (2016). *Gerencia de Proyecto: Análisis y evaluaciones de riesgo en la construcción*.

Arriaga, B. A. (2013). *Construcción del proyecto de Edificación de la SEDE alterna CENEVAL*.

Ramírez, C. A., Hernández, Y. A., & Macuil, S. (2012). *Diseño geotécnico de la lumbreira 04 del Túnel Emisor Oriente*.

Martínez, S. A. (1998). *Muro Milán y Prefabricados*.