



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL – (GEOTECNIA)

ESTUDIO GEOTÉCNICO DE LA LUMBRERA 20 DEL
TÚNEL EMISOR ORIENTE (TEO)

TESIS PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
LUIS SERGIO UZÁRRAGA DÍAZ

TUTOR PRINCIPAL
DR. SALVADOR MARÍN CORDÓVA, FACULTAD DE INGENIERÍA

MÉXICO, D. F. MARZO 2013



JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Rivera Constantino Rigoberto
Secretario: M. I. Castilla Camacho Jorge Efraín
Vocal: Dr. Marín Córdova Salvador
1^{er}. Suplente: Dr. Flores Castrellón Osvaldo
2^{do}. Suplente: M.I. Deméneghi Colina Agustín

Lugar donde se realizó la tesis: México D.F.

TUTOR DE TESIS:

Dr. Salvador Marín Córdova

FIRMA



AGRADECIMIENTOS:

A la UNAM y al CONACYT por su apoyo institucional para la realización y finalización de esta maestría.

A la CFE por las facilidades en el uso de su información técnica con fines académicos.

A mi tutor y sinodales por su guía y crítica para el mejoramiento de este trabajo.

A mi esposa y mis padres por su apoyo y comprensión a lo largo de estos últimos años.

A mis compañeros de la maestría por su amistad y camaradería.

Y finalmente, al pueblo de nuestro país, ya que gracias al pago de sus contribuciones ayuda a mejorar la educación pública y formar especialistas útiles a México.



ÍNDICE

RESUMEN	X
1.0 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Obras de drenaje.....	2
1.2 Necesidad de un nuevo drenaje profundo	2
1.3 Nuevo Túnel Emisor Oriente (TEO).....	2
1.4 Objetivo	3
1.5 Actividades	3
1.6 Alcances.....	3
1.7 Contenido de la tesis	4
2.0 ESTUDIOS PRELIMINARES	5
2.1 Trazo del TEO	5
2.1.1 Trayectoria del TEO.....	5
2.2 Descripción del sitio y del proyecto de la lumbrera 20 (L20).....	8
2.3 Clima y vegetación	8
2.4 Hidrografía ⁴	9
2.4.1 Ríos en la zona.....	9
2.4.2 Almacenamientos	9
2.5 Sismicidad	9
2.5.1 Clasificación de la estructuras (L20).....	10
2.6 Impacto Ambiental	10
2.7 Antecedentes en las técnicas de construcción de lumbreras	11
2.7.1 Técnica <i>Solum</i>	12
2.7.2 Técnica <i>Icos</i>	13
2.7.3 Técnica de anillos prefabricados.....	16
3.0 GEOLOGÍA	23
3.1 Fisiografía.....	23



3.2	Marco geológico regional.....	24
3.3	Geología local del sitio de la L20.....	25
3.3.1	Unidades litoestratigráficas.....	26
3.3.2	Sección geológica de la L20.....	27
4.0	EXPLORACIÓN GEOTÉCNICA	28
4.1	Objetivos.....	28
4.1.1	Objetivos generales	28
4.1.2	Objetivos específicos	28
4.2	Métodos indirectos de exploración	29
4.2.1	Exploración geofísica.....	29
4.2.2	Resultados de exploración geofísica (L20).....	29
4.3	Programa de exploración directa.....	31
4.4	Exploración geotécnica directa en L20.....	32
4.4.1	Prueba de Penetración Estándar (SPT).....	32
4.4.2	Sondeo Selectivo (SS).....	36
4.4.3	Instrumentación	38
5.0	TRABAJOS DE LABORATORIO	40
5.1	Pruebas mecánicas realizadas para determinar el esfuerzo cortante y propiedades esfuerzo-deformación en los suelos de la L20.....	41
5.2	Resultados e interpretación.....	43
6.0	MODELO Y DISEÑO GEOTÉCNICO DE LA LUMBRERA 20.....	44
6.1	Unidades Geotécnicas.....	44
6.2	Propiedades mecánicas del suelo contiguo a la L20.....	45
6.3	Determinación del método de construcción y estabilización de la L20.....	47
6.3.1	Análisis geotécnicos de la L20.....	48
6.3.2	Revisión geotécnica de la falla de fondo.....	49
6.3.3	Revisión geotécnica de la subpresión (excavación completa del núcleo).....	51



6.3.4	Modelado numérico de la L20	52
6.3.5	Análisis de la estabilidad de la primera etapa de construcción	58
6.3.6	Análisis de la estabilidad del sistema de anillos prefabricados (AP)	61
6.3.7	Análisis de la estabilidad de la segunda etapa de construcción	66
6.3.7.1	Análisis de la estabilidad de la zanja anular y del núcleo central para la construcción de paneles para el muro Milán.....	67
6.3.7.2	Módelación de la segunda etapa de construcción	71
6.3.8	Estabilidad por flotación de la estructura	78
6.3.9	Estabilidad por sismo de la lumbrera	79
6.4	Estados límite de servicio	82
6.5	Datos geotécnicos para el diseño estructural de la lumbrera	82
7.0	SISTEMA CONSTRUCTIVO DE LA LUMBRERA 20.....	83
7.1	Sistema constructivo, primera etapa de construcción.....	83
7.2	Sistema constructivo, segunda etapa de construcción,	86
	CONCLUSIONES.....	94
	ANEXOS	96
	BIBLIOGRAFÍA.....	114



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Cuenca del valle de México con los cinco grandes lagos	1
Figura 2. Trayectoria del TEO desde su inicio en el Distrito Federal y su paso por el Estado de México hasta su desembocadura en el estado de Hidalgo (S/E).....	5
Figura 3. Sexta etapa del TEO en su paso por los municipios de Huehuetoca, Tepeji del Río y Atotonilco de Tula en los estados de México e Hidalgo, respectivamente (S/E).	7
Figura 4. Excavación de lumbrera con técnica <i>Solum</i> , excavación de las paredes de la lumbrera.....	12
Figura 5. Excavación de lumbrera con técnica <i>Solum</i> . a) excavación del núcleo central, b) colado de la losa fondo de la lumbrera.....	13
Figura 6. Técnica <i>Icos</i> , a) Trazo de la circunferencia de la lumbrera y hexágono, b) Colado de las paredes del hexágono, c) Juntas de colado.....	14
Figura 7. Técnica <i>Icos</i> , a) Colado de corona y anillo, b) Colocación de columnas en las esquinas del hexágono, c) Colado de losa fondo.....	15
Figura 8. El brocal exterior con placas metálicas ancladas.	16
Figura 9. a) Trabes-guías instaladas, b) Refuerzo tipo radial en primer anillo, c) Colado de losa fondo.	17
Figura 10. a) Instalación de anillos superiores, b) Colado de espacio anular.....	18
Figura 11. Brocal del muro Milán.....	19
Figura 12. Almeja libre autoguiada, operada con cables.....	21
Figura 13. Junta de muro Milán.....	22
Figura 14. Provincia Fisiográfica del Eje Neovolcánico	23
Figura 15. Carta Geológica-Minera, Estado de México	25
Figura 16. Perfil Geológico de la L20 y del TEO en las 5ª y 6ª etapas.....	27
Figura 17. Resultados del SEV realizado en la lumbrera 20.....	30
Figura 18- Esquema general del equipo necesario para realizar un ensayo SPT	32
Figura 19. Perfil estratigráfico de la lumbrera 20 obtenido por medio de la prueba de Penetración Estándar.....	35
Figura 20. Sondeos selectivos de la lumbrera 20	37
Figura 21. Diagrama de esfuerzos-deformaciones.....	41
Figura 22. Círculos de Mohr en rotura en un ensayo UU (tensiones totales).....	42
Figura 23. Mecanismo de falla de fondo en la lumbrera 20.....	50
Figura 24. Mecanismo de falla por supresión de la lumbrera 20.....	51



Figura 25. (a) Modelado del corte de la lumbrera, (b) Condiciones piezométricas, (c) Discretización del modelo geotécnico por el MEF.....	54
Figura 26. Malla de elementos finitos deformados determinándose un FS=0.80	55
Figura 27. Empujes horizontales totales	56
Figura 28. Mecanismo hipotético de falla en el corte de la lumbrera	57
Figura 29. Modelado de la primera etapa de excavación, excavando en etapas parciales de 3m de profundidad.....	58
Figura 30. Malla de elementos finitos deformada al finalizar la revisión de la primera etapa de construcción	59
Figura 31. Ampliación de los desplazamientos horizontales del elemento de retención de la primera etapa	59
Figura 32. Factor de seguridad en la primera etapa de excavación.....	60
Figura 33. Reacciones generadas por los anillos prefabricados.....	60
Figura 34. Secuencia constructiva, primera etapa de construcción de la L20.....	64
Figura 35. (a) Deformaciones horizontales, (b) Deformaciones verticales	65
Figura 36. Modelado numérico de la zanja anular y el núcleo central para construcción de paneles de muro Milán.....	69
Figura 37. (a) Desplazamientos a lo largo de la zanja anular, (b) Desplazamientos del núcleo central.	70
Figura 38. Secuencia constructiva, segunda etapa de construcción de Lumbrera 20	76
Figura 39. (a) Deformaciones horizontales, (b) Deformaciones verticales.	78
Figura 40. Parámetros sísmicos obtenidos del PRODISIS.	80
Figura 41. Fuerza sísmica representada en el modelo numérico.	81
Figura 42. a) Brocal con placas metálicas para fijado de estructura metálica, b) Trabes-guías verticales.	83
Figura 43. a) Primer anillo reforzado, b) Colocación del anillo hasta el fondo de la excavación.	84
Figura 44. a) Colado de losa fondo de la lumbrera, b) instalación de anillos superiores, c) Relleno del espacio anular.....	85
Figura 45. Hidrofresa, excavadora vertical.....	87
Figura 46. Recirculación de lodos en excavación de tableros	88
Figura 47. Junta de muro Milán	89
Figura 48. Detalle de la colocación de armados	90
Figura 49. Centrales	91
Figura 50. Secuencia de construcción de tableros para muros Milán	92
Figura 51. Excavación por etapas en núcleo central para la instalación de anillos prefabricados en muro Milán de los 40 a los 62 m de profundidad.	93



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Etapas de construcción del Túnel Emisor Oriente (TEO)	6
Tabla 2. Datos geográficos de lumbreras de la sexta etapa.....	8
Tabla 3. Tipos de sondeos y sus aplicaciones generales.....	31
Tabla 4. Correlaciones entre N , q_u y la consistencia	33
Tabla 5. Correlaciones entre N y la compacidad relativa	34
Tabla 6. Longitudes de cada tipo de sondeo en la L20.	37
Tabla 7. Modelo Geotécnico 1 (MG-1) propuesto para la L20.....	46
Tabla 8. Factores de seguridad al finalizar la primera etapa de construcción de la L20	66

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. FS relativo a la falla de fondo a lo largo de la excavación de la L20.....	50
Gráfica 2. FS de la estabilidad de la zanja anular para la construcción del muro Milán	68



Resumen

En este trabajo se realizó el diseño geotécnico y la propuesta de un método constructivo para la lumbrera 20 del Túnel Emisor Oriente (TEO); La razón fundamental para la elaboración de esta tesis es revisar aspectos técnicos y constructivos de esta obra *sui generis*, en este, caso una lumbrera de más de 150 m de profundidad, cifra equivalente a la altura de un edificio de 50 pisos.

La base de éste trabajo son los informes técnicos elaborados por la Gerencia de Estudios de Ingeniería Civil (GEIC) de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), dentro del marco de los estudios geotécnicos preliminares, realizados para los análisis de factibilidad técnico-económica del TEO y en el caso particular de la lumbrera 20.

Adicionalmente a la información de la GEIC, se recopilaron antecedentes de la construcción de lumbreras y muros Milán en México, donde se describió su procedimiento constructivo, así como su aplicación, dependiendo del tipo de suelo y las condiciones físicas del sitio de la obra.

Con la información de los sondeos exploratorios y las pruebas de laboratorio realizadas, se procedió al análisis de sus resultados y con esta información se definió un modelo geotécnico del sitio.

Con la determinación del modelo geotécnico, así como las especificaciones geométricas de la lumbrera 20, se propuso un método de construcción, verificando los estados límites siguientes:

1.-Estados límites de falla

- a) Estabilidad del fondo de la excavación contra falla por cortante y subpresión.
- b) Estabilidad de las paredes de la excavación.
- c) Estabilidad de la zanja para la construcción de los muros perimetrales.
- d) Estabilidad del núcleo central.
- e) Condición de flotación de la lumbrera terminada.
- f) Estabilidad de la lumbrera bajo acciones sísmicas.

2.-Estados límites de servicio

- a) La lumbrera debe construirse sin provocar movimientos indeseables en las construcciones y servicios públicos contiguos.



Para las revisiones técnicas, se tomó como referencia las disposiciones indicadas dentro de las Normas Técnicas Complementarias para el Diseño de Cimentaciones del Reglamento de Construcciones vigente en el Distrito Federal.

Aunado a las revisiones indicadas, la información geotécnica de la lumbrera y el sistema constructivo propuesto se modelaron numéricamente en el programa de elementos finitos PLAXIS V8.2, el cual, se usó como una herramienta predictiva ante un comportamiento esperado, así como para verificar y calibrar la eficiencia del procedimiento constructivo.

Las ventajas principales en el uso del programa, es la modelación de la secuencia constructiva, la incorporación de los sistemas de estabilización utilizados como concreto lanzado, anillos prefabricados, muros Milán, etc., así como determinar el comportamiento del suelo ante el abatimiento del nivel de aguas freáticas, excavaciones, construcción de los elementos de retención, entre otros casos.

Con los resultados de las revisiones de los estados límite y los obtenidos del PLAXIS, se definió el sistema constructivo más adecuado.

1.0 Introducción

La zona Metropolitana del Valle de México, está construida sobre una cuenca cerrada, que originalmente formaba un sistema lacustre integrado por cinco grandes lagos: Texcoco, Xaltocan, Zumpango, Xochimilco y Chalco (figura 1).

En época de lluvias, estos lagos, se convertían en uno solo de dos mil kilómetros cuadrados de superficie. Esta condición, explica las periódicas inundaciones que desde la fundación de Tenochtitlán han enfrentado sus habitantes, así como la necesidad de construir importantes obras de drenaje para el control y desalojo de las aguas residuales y pluviales del valle.



Figura 1. Cuenca del valle de México con los cinco grandes lagos¹

¹ www.conagua.gob.mx



1.1 Obras de drenaje

La construcción de la Ciudad de México sobre lo que eran los lagos, ocasionó dos problemas permanentes: la necesidad de desalojo del agua de lluvia para evitar inundaciones y el hundimiento por la sobre-explotación de los mantos acuíferos.

- En los siglos XVII y XVIII, se realizó el tajo de Nochistongo.
- En 1900, Porfirio Díaz inauguró el Gran Canal del Desagüe con el primer túnel de Tequisquiác, que fue la solución para proteger contra inundaciones el área urbana de hace un siglo.
- En 1962, se puso en servicio el Emisor Poniente.
- En 1975, Luis Echeverría inauguró el Emisor Central de 50 kilómetros, componente principal del actual drenaje profundo.

1.2 Necesidad de un nuevo drenaje profundo

Hoy la capacidad del sistema de drenaje de la zona Metropolitana es insuficiente y presenta serios problemas. Basta comparar la capacidad que tenía en 1975 con la que tiene en la actualidad, que es 30% menor con casi el doble de población. Esta disminución se debe principalmente al constante hundimiento de la Ciudad de México, originado por la sobreexplotación de los mantos acuíferos del Valle de México.

A pesar de que el Emisor Central es el ducto del cual depende la seguridad del desalojo de las aguas residuales y pluviales del valle, es necesario cerrarlo durante los meses de estiaje para su reparación y mantenimiento. Esto plantea la urgente necesidad de disponer de un emisor alternativo que permita mantener la capacidad de operación del sistema durante todo el año.

1.3 Nuevo Túnel Emisor Oriente (TEO)

Para resolver de fondo la problemática del sistema de drenaje, es necesario construir un nuevo drenaje profundo: el Túnel Emisor Oriente, de 62 kilómetros y siete metros de diámetro.

Esta monumental obra de ingeniería permitirá contar con una salida complementaria y alterna al Emisor Central, que abatirá el riesgo de inundaciones en la Ciudad de México y su zona conurbada y dará seguridad a 20 millones de habitantes. En temporada de lluvias, funcionará de manera simultánea con el actual drenaje profundo y, en época de secas, lo hará alternadamente para facilitar su mantenimiento.



El TEO se terminará en cuatro años y podrá conducir en promedio 150 metros cúbicos por segundo, estará compuesto por 24 Lumbreras con profundidades que van de 26 hasta 150 metros. La construcción de sus 62 kilómetros de longitud se dividió en seis frentes o secciones, los cuales miden aproximadamente 10 kilómetros cada uno.

El túnel iniciará en la segunda lumbrera del túnel interceptor del Río de los Remedios, y terminará en el municipio de Atotonilco de Tula, en Hidalgo, cerca del actual portal de salida del Túnel Emisor Central, en su confluencia con el río El Salto.

1.4 Objetivo

Este trabajo tiene por objetivo, lo siguiente: analizar la información de los trabajos de exploración geotécnica ejecutados y revisar la estabilidad del sistema constructivo propuesto, para el caso particular de la lumbrera 20 del TEO.

1.5 Actividades

Para cumplir con el objetivo mencionado, será necesario realizar las siguientes actividades:

- Recopilar información general de la zona de estudio.
- Recopilar información relativa a los estudios geotécnicos realizados en la lumbrera 20, así como de los trabajos de laboratorio ejecutados.

1.6 Alcances

Con la información recopilada se definirá lo siguiente:

- Definir un modelo geotécnico del sitio, asignando parámetros mecánicos a las unidades geotécnicas establecidas.
- Establecer un método de construcción y revisar su estabilidad.
- Con los resultados de las revisiones, realizar las modificaciones y recomendaciones al sistema constructivo definitivo.



1.7 Contenido de la tesis

El capítulo 2, contiene la información del trazo del TEO y la descripción física del sitio de estudio así como los antecedentes en las técnicas de construcción de lumbreras y muros Milán realizados en México.

En el capítulo 3, se encuentra la información geológica de la región donde se localiza la zona en estudio y para el caso particular de la lumbrera 20.

En los capítulos 4 y 5, se describen los trabajos de exploración realizados, las pruebas de laboratorio y la interpretación de sus resultados.

En el capítulo 6, se define el modelo geotécnico de la lumbrera 20, se indican los lineamientos para un método de construcción y se analiza su estabilidad.

En el capítulo 7, se define el sistema constructivo definitivo con base en la revisión de los estados límite y de servicio, así como de la modelación numérica de la lumbrera.

Por último, se presentan las conclusiones y recomendaciones.

2.0 Estudios preliminares

2.1 Trazo del TEO²

2.1.1 Trayectoria del TEO

El (TEO da inicio en la lumbrera L-0 en el km 0+000, en la esquina Sur-Este del cruce formada por las Avenidas Gran Canal y Anillo Periférico, en este sitio confluyen el Gran Canal con el Río de los Remedios, en la Col. 25 de Julio, dentro de la Delegación Gustavo A. Madero, D.F.

A partir de ahí, el trazo se desarrolla por la margen izquierda del Gran Canal, cruza el municipio de Ecatepec de Morelos, continua sobre los límites de los municipios de Coacalco y Tecámac, posteriormente pasa por los municipios de Tonanitla, Nextlalpan, Jaltenco, Zumpango, Teoloyucan, Huehuetoca, Tepeji del Río y finalmente concluirá en el municipio de Atotonilco de Tula en la cercanías de la salida del Túnel Emisor Central (TEC), tendrá una longitud de 62 km, diámetro de 7 m, y una capacidad para desalojar 150 metros cúbicos por segundo (m^3/s) (figura 2).

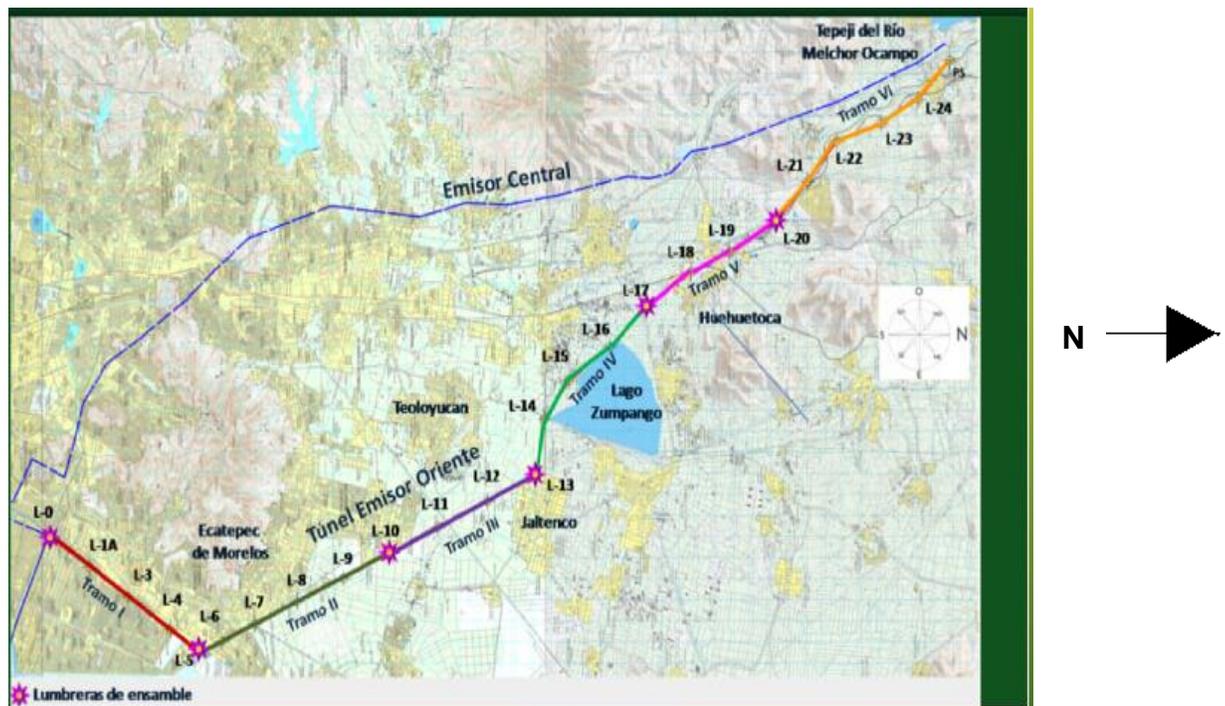


Figura 2. Trayectoria del TEO desde su inicio en el Distrito Federal y su paso por el Estado de México, hasta su desembocadura en el estado de Hidalgo (S/E).²

² www.conagua.gob.mx



El TEO es una obra hidráulica subterránea para desalojar las aguas residuales y pluviales provenientes de los túneles Interceptor Oriente y Río de los Remedios, cuyos caudales confluirán en la lumbrera L-2 del Túnel Río de los Remedios, a partir de ahí el agua se conducirá por gravedad por el Emisor Oriente hasta el sitio denominado El Salto, en el estado de Hidalgo.

El trazo del túnel irá en sus primeros 10 km por la margen izquierda del Gran Canal en dirección Noreste, después, pasará por debajo del Gran Canal y tendrá una ligera deflexión hacia el Noroeste, de ahí continuará prácticamente paralelo a la margen derecha del Gran Canal hasta el km 38+500, en este sitio deflexionará completamente al Noroeste, cruzará a la margen izquierda y llegará cerca de la parte sur de la laguna de Zumpango, continuará en esa dirección hasta interceptar con el Canal de Castera y seguirá paralelo a este Canal, pasará por el costado izquierdo de la laguna de Zumpango, cruzará el Canal de Santo Tomás, hasta el Canal Cuautitlán y continuará prácticamente paralelo y en la margen derecha de este cuerpo, hasta su Portal de Salida en el Salto.

El número de lumbreras se ha estimado en el orden de 24, con un diámetro de 12 y 16 m y profundidades que oscilan entre 40 a 150 m, el número de éstas, es el resultado de los cambios de dirección del trazo del túnel y por lumbreras intermedias, éstas se consideran en los casos en que la distancia entre lumbreras resulta mayor a 3 km, dándose el caso también en que la factibilidad de disponer de los predios donde originalmente estaban proyectadas sea nula, arroja la necesidad de proyectar nuevas lumbreras en predios con acceso libre.

De acuerdo con el programa de construcción de la CONAGUA, el TEO se construirá en 6 etapas, mismas que se enlistan a continuación:

Tabla 1. Etapas de construcción del Túnel Emisor Oriente (TEO)³

Etapas	Lumbrera Inicial	Lumbrera Final
Primera	L-0	L-5
Segunda	L-5	L-10
Tercera	L-10	L-13
Cuarta	L-13	L-17
Quinta	L-17	L-20
Sexta	L-20	PS

³ www.conagua.gob.mx



El presente trabajo estudia las condiciones geotécnicas referentes a la lumbrera 20, localizada dentro de la sexta etapa del TEO, esta última abarca de la lumbrera 20 (L-20) al Portal de Salida (PS).

La sexta etapa, se localiza al Noroeste de la cuenca del Valle de México, en los linderos de los municipios de Huehuetoca, Tepeji del Río y Tula de Allende de los estados de México e Hidalgo, la zona se considera una llanura del Río Tula y está situada en la región geográfica del Valle del Mezquital, que se caracteriza por la existencia de valles y llanos interconectados y está delimitada entre las coordenadas del Sistema Universal Transversal de Mercator (UTM): 465 000 a 481 000 de Longitud Oeste y de 2 194 000 a 2 208 000 de Latitud Norte (figura 3).⁴

Las vías de acceso principales en la zona son la autopista México-Querétaro, el libramiento Jorobas-Tula y la carretera Huehuetoca - Apaxco, ésta última se localiza a la entrada de la L-20.

De acuerdo con la información de CONAGUA, la profundidad de las lumbreras fue calculada con la pendiente de 0.0019 de la lumbrera 0 a la 6 y de 0.0016 de la lumbrera 6 al portal de salida; Las características geométricas principales de cada lumbrera correspondientes a la sexta etapa se presentan en la Tabla 2.⁵



Figura 3. Sexta etapa del TEO en su paso por los municipios de Huehuetoca, Tepeji del Río y Atotonilco de Tula en los estados de México e Hidalgo, respectivamente(S/E).⁵

⁴ www.wikipedia.com

⁵ Subgerencia de Geotecnia y Materiales de la CFE, México 2009, Estudio de Factibilidad Técnica e Ingeniería Básica para la Elaboración del Proyecto Ejecutivo y la Construcción del Túnel Emisor Oriente, ubicado en el Distrito Federal y los estados de México e Hidalgo.

Tabla 2. Datos geográficos de lumbreras de la sexta etapa⁶

Lumbrera	Coordenadas UTM		Cadenamiento con respecto al trazo del túnel	Diámetro interior de la lumbrera (m)	Nivel de brocal (msnm)	Nivel de rasante hidráulica (msnm)	Altura interior (m)
	X	Y					
L-20	476,847.80	2,196,790.25	49+572.68	16	2269.39	2121.21	148.17
L-21	474,927.86	2,198,591.42	52+211.44	12	2239.83	2116.00	122.84
L-22	472,974.55	2,200,182.97	54+731.96	12	2223.18	2112.96	110.23
L-23	471,880.28	2,202,581.39	57+384.30	12	2195.39	2108.71	86.68
L-24	470,959.96	2,203,699.18	58+838.93	12	2191.79	2106.39	85.40

2.2 Descripción del sitio y del proyecto de la lumbrera 20 (L20)

La lumbrera L20 tendrá un diámetro interior de 16m y se ubicará en la margen derecha del Canal Cuautitlán, entre la vía del ferrocarril y los ductos de Pemex, al Este de la unidad habitacional Santa Teresa V, dentro del municipio de Huehuetoca, estado de México (figura 1, anexo).

El polígono de influencia de la lumbrera tiene dimensiones en planta de 100 m de largo por 30 m de ancho (Figura 2, Anexo) y presenta una topografía con ligera pendiente de Norte a Sur.

2.3 Clima y vegetación⁷

El clima de la zona de estudio se define como templado seco, los meses con calor más intensos son: Mayo, Junio y Julio. Se considera que la temperatura mínima es de 6.9°C y la máxima de 23.8°C, lo que da un promedio de 15.4°C. Los meses de lluvia son Junio, Julio, Agosto y Septiembre; la precipitación pluvial es de 628 milímetros, la vegetación predominante son los cultivos de maíz y frijol y algunas hortalizas.

⁶ www.conagua.gob.mx

⁷ <http://e-local.gob.mx/work/templates/enciclo/EMM15mexico/municipios/15035a.html>



2.4 Hidrografía⁴

2.4.1 Ríos en la zona

La hidrografía está representada principalmente por el río Cuautitlán, que cruza de Sur a Norte por la población de Huehuetoca, el cual toma el nombre de Tajo de Nochistongo, por la población que existió en este lugar y más adelante es conocido como río Tula.

2.4.2 Almacenamientos

Se cuenta con dos presas de importancia para la agricultura, la Cuevecillas, con capacidad aproximada de 1 millón de metros cúbicos y riega los ejidos de Coyotepec, Huehuetoca y San Juan Zitlaltepec y la Piedra Alta, que se localiza en el ejido de Xalpa, del pueblo de San Buenaventura, con aproximadamente la misma capacidad, que la anterior.

Existen 15 bordos y jagüeyes, los más importantes son el de San Miguel de los Jagüeyes y el de Jagüey Prieto, que son usados como abrevaderos y además existen 23 pozos profundos.

2.5 Sismicidad⁸

La República Mexicana se divide en cuatro zonas sísmicas, esto se realizó con fines de diseño antisísmico. Para realizar esta división se utilizaron los catálogos de sismos del país desde inicios del siglo 20, grandes sismos que aparecen en los registros históricos y los registros de aceleración del suelo de algunos de los grandes temblores ocurridos. Estas zonas son un reflejo de qué tan frecuentes son los sismos en las diversas regiones y la máxima aceleración del suelo a esperar durante un siglo.

La zona de estudio se localiza en la zona B, clasificada como una zona intermedia, donde se registran sismos no tan frecuentemente o con zonas afectadas por altas aceleraciones pero que no sobrepasan el 70% de la aceleración de la gravedad (figura 3, anexo).

⁸ Servicio Sísmico Nacional 2011, www.ssn.unam.mx



2.5.1 Clasificación de la estructuras (L20)⁹

De acuerdo con el manual de diseño por sismo de la CFE, las estructuras relacionadas con el TEO se clasifican como del grupo “A” en las cuales se requiere un alto grado de seguridad, son construcciones cuya falla causaría una pérdida elevada de vidas humanas, económicas y culturales de gran magnitud.

Las lumbreras del TEO se definen como del tipo 3, las cuales se componen de muros de retención circular, estructuras que por su altura soportan grandes empujes laterales de tierra e hidrostáticos.

2.6 Impacto Ambiental¹⁰

El rápido crecimiento de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), los asentamientos regionales debido a la sobre explotación de los mantos acuíferos y las intensas lluvias acrecentadas por el calentamiento global, hacen insuficiente la infraestructura hidráulica actual para atender las necesidades del Valle de México.

Para contrarrestar este panorama, la CONAGUA está llevando a cabo una serie de obras que aumenten la capacidad de desalojo de aguas residuales y pluviales en la ZMVM, entre el que destaca el “Túnel Emisor Oriente” TEO.

El uso de suelo actual, donde se construirá la L-20 del TEO, es principalmente para uso agrícola de riego y temporal, así como para actividades ganaderas, en los alrededores de la zona hay que destacar el uso habitacional que corresponde a comunidades dentro del municipio de Huehuetoca.

Debido a que se trata de una lumbrera con una profundidad de más que 100 m y que ésta ocupará una superficie confinada, se determinará que la lumbrera 20 del TEO modificará de manera poco significativa el escenario ambiental en cuanto a geomorfología, suelo, hidrología, vegetación y fauna.

⁹ CFE, Manual de Diseño de Obras Civiles, Diseño por Sismo, 2008

¹⁰ CONAGUA Manifestación de Impacto Ambiental, modalidad particular, para la obra que da cumplimiento a lo dispuesto en la condicionante número dos del resolutivo de la manifestación de impacto ambiental (MIA), modalidad particular, correspondiente al proyecto denominado:

“Proyecto para la Construcción del Túnel Emisor Oriente, para incrementar la capacidad de desalojo de las aguas residuales y pluviales del Valle de México, y disminuir los riesgos de inundación a la población asentada en la zona”, elaborado por Planeación y Proyectos de Ingeniería, S.C, 2010



Al finalizar el proyecto, los impactos más altos que se registran son benéficos y le corresponden a la apariencia visual del paisaje y a la eliminación del riesgo de inundaciones en zonas habitacionales. En términos generales, no se presentarán impactos ambientales relevantes como resultado de la ejecución de la obra, debido a que no se provocaran alteraciones en el ecosistema y sus recursos naturales; así mismo, se ajusta a los usos del suelo actual y futuro en la zona, así como los lineamientos establecidos en la normatividad vigente en materia ambiental, además que proporcionará empleo a los pobladores de los municipios involucrados.

2.7 Antecedentes en las técnicas de construcción de lumbreras¹¹

Las lumbreras, son accesos verticales o inclinados que permiten realizar todas las operaciones auxiliares en la construcción de un túnel: barrenación, poblado, tronada, ventilación, bombeo, rezaga, amacice, revestimiento, instalaciones eléctricas y de aire comprimido, traslado de equipo y acceso de personal. Pueden atravesar diferentes tipos de material, tales como: arcillas, tobas, andesitas, arenas, basalto, limolita, tezontle, etc.

Los procedimientos de construcción para lumbreras varían de acuerdo al tipo de terreno donde están construidas y se pueden subdividir en dos grandes grupos:

- a) Lumbreras construidas en arcillas y limos
- b) Lumbreras construidas en depósitos más resistentes.

La construcción de una lumbrera es una obra de bastante importancia. Implica el respeto puntual de programas, procedimientos y una supervisión eficaz y escrupulosa de las distintas actividades constructivas. Obliga, en suma, a desarrollar un trabajo de ingeniería cuidadoso, que incluye planeación, un diseño previo y la implantación de normas de seguridad estrictas.

Entre las técnicas más comunes para la construcción de lumbreras en México, han sido utilizadas las *Solum* (Mexicana), *Icos* (Italiana) y *Anillos Prefabricados* (Mexicana). Los procedimientos son bastante parecidos, las excavaciones se realizan por sectores y se estabilizan con lodos bentoníticos, después con un tubo "tremie" se cuelan los muros, luego, se excava el núcleo y al final se excava el fondo de la lumbrera.

¹¹ Moreno Fernández A., Lumbreras y Túneles en suelos, Trabajo de ingreso a la academia de ingeniería, México, 1991

2.7.1 Técnica *Solum*¹²

Esta consiste esencialmente en tres pasos:

- a) Se marca sobre el terreno la lumbrera, se divide ésta en seis partes, cada una con un ángulo de 60°, después se procede a realizar perforaciones en cada una de las divisiones realizadas, junto a la circunferencia marcada, con el diámetro del espesor de la pared de la lumbrera y una separación aproximada de 60 cm, la perforación debe ser estabilizada con lodo bentonítico, el suelo entre cada perforación se extrae por medio de almeja, sustituyendo en todo momento el material excavado por lodos. Una vez terminada la excavación de una de las fracciones en que fue dividida la lumbrera, se procede a colar y a continuar con el procedimiento descrito en otro cuadrante de la lumbrera (de manera alternada) (figura 4).

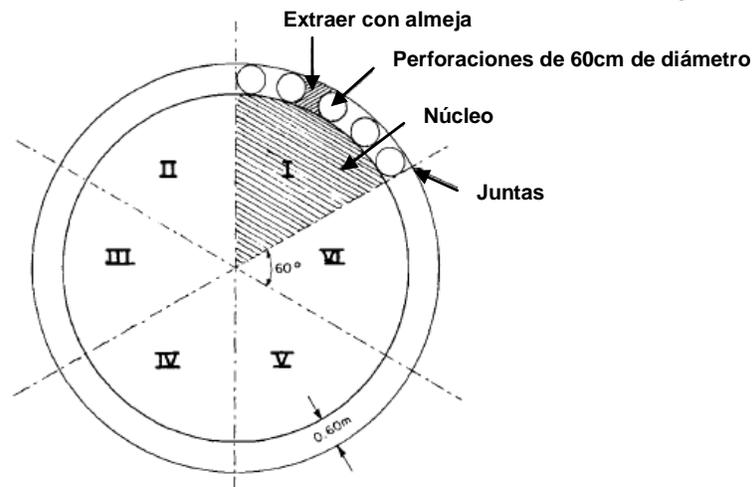


Figura 4. Excavación de lumbrera con técnica *Solum*, excavación de las paredes de la lumbrera¹²

- b) Ya colados todos los sectores de la lumbrera, se procede a la excavación del núcleo central, por medio de almeja, sustituyendo en todo momento el material excavado por lodos, con el fin de eliminar las expansiones al fondo de la lumbrera (figura 5).
- c) Después de excavar el núcleo central hasta la profundidad de proyecto, se cuela una plantilla de concreto en el fondo de la lumbrera, posteriormente se limpia el azolve y se baja una parrilla de acero, con el fin de colar una losa auxiliar, todo bajo los lodos. Terminado la losa se extraen los lodos y se calafatea la junta losa-muro para evitar la entrada de agua o de material

¹² Departamento del Distrito Federal, Memoria técnica de las obras del drenaje profunda del Distrito Federal, 1970

al interior de la lumbrera, para finalmente colar la losa definitiva de concreto, empotrándola de manera adecuada a los muros de la lumbrera (figura 5).

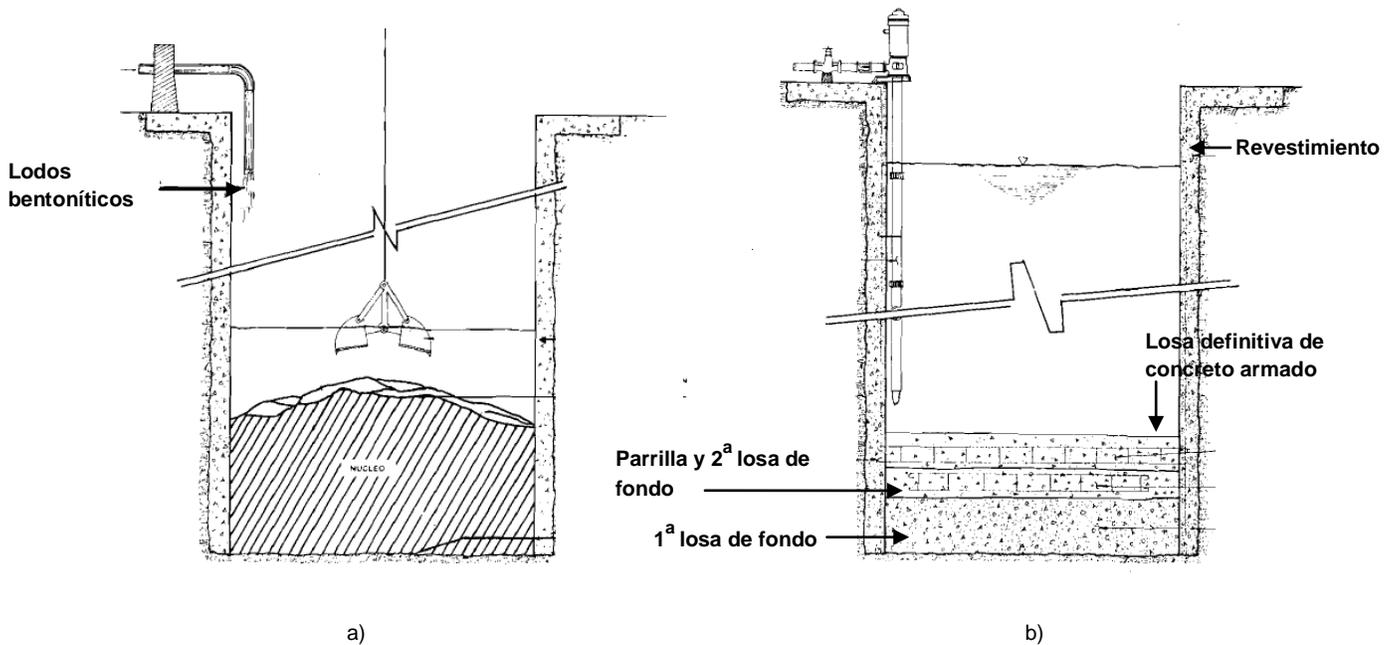


Figura 5. Excavación de lumbrera con técnica Solum, a) excavación del núcleo central, b) colado de la losa fondo de la lumbrera.¹²

2.7.2 Técnica Icos

El procedimiento de construcción es el siguiente:

- Se marca en el terreno el círculo de la lumbrera y un hexágono circunscribiendo a éste, donde posteriormente se colocarán los muros rectos del revestimiento primario, en el exterior se construye un brocal para colocar la máquina perforadora y la almeja. Posteriormente, se realizan perforaciones de 60 cm de diámetro sobre el trazo del hexágono, con una distancia aproximada de 2 m, debiendo coincidir las perforaciones con las esquinas de éste, el material dejado entre las perforaciones será extraído por medio de almeja, sustituyendo en todo momento el material excavado por lodos bentoníticos (figura 6).
- Al finalizar la excavación en uno de los lados del hexágono, se procede a su colado, con la técnica del tubo tremie, siguiendo en tresbolillo la excavación de los siguientes lados del hexágono, hasta su finalización. Para las juntas de colado se dejara una tubería que impedirá

que el concreto se salga de su lugar, para posteriormente ser extraída una vez que el concreto inicie su fraguado (figura 6).

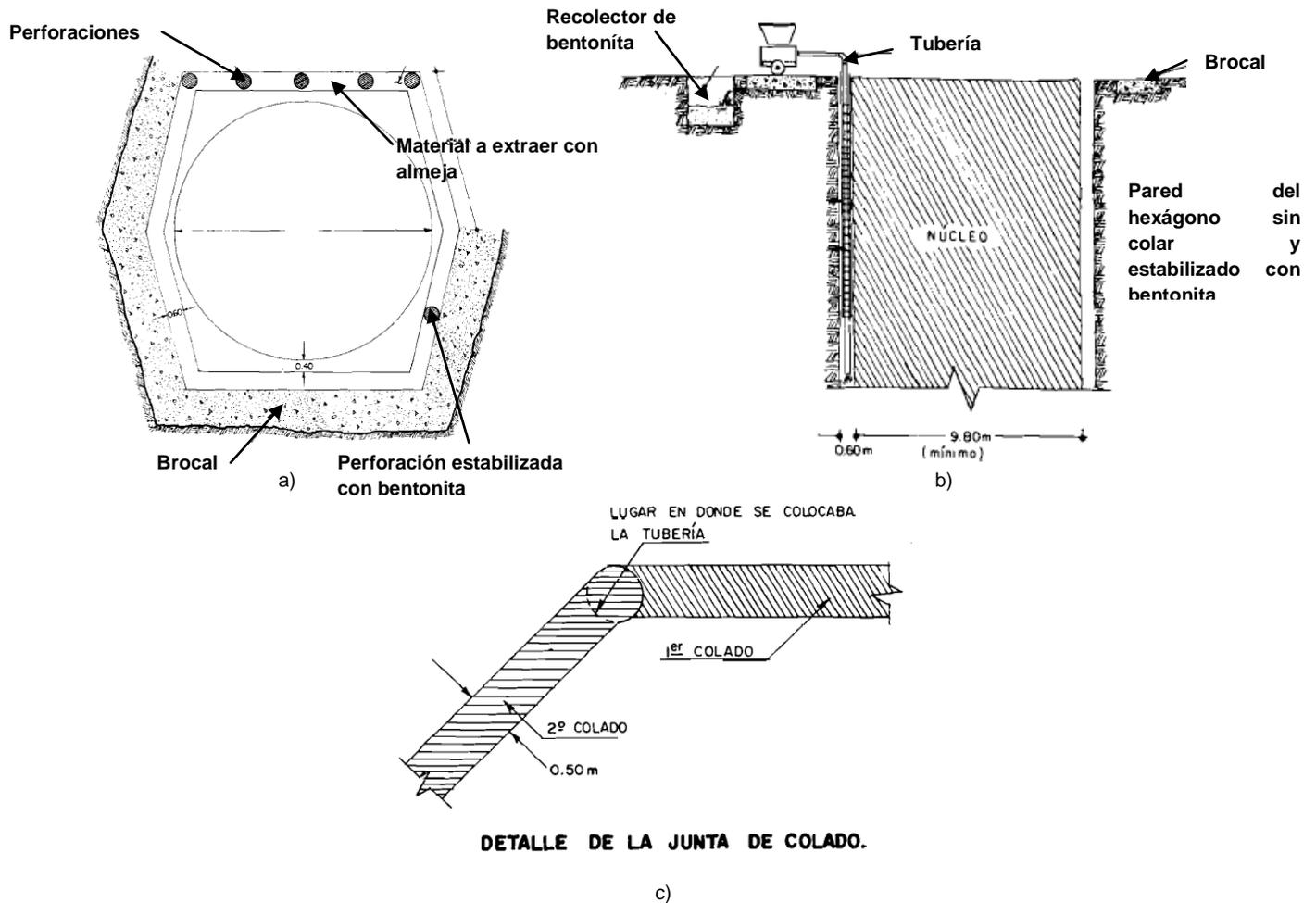


Figura 6. Técnica Icos, a) Trazo de la circunferencia de la lumbrera y hexágono, b) Colado de las paredes del hexágono, c) Juntas de colado.¹²

c) Después de colar la totalidad de las paredes del hexágono, se procede a excavar de forma manual, una corona de 1.4 m de altura, con el fin de rigidizar la parte superior de la lumbrera, colándose en forma monolítica con el primer anillo del revestimiento secundario y anclado a la pared del hexágono (el anillo será de 2 m de altura) (figura 7).

d) Al colar el anillo y la corona, se retira la cimbra y se excava el núcleo central hasta una profundidad de 3 m, como paso siguiente, se procede a colar en las esquinas del hexágono unas pequeñas columnas, ancladas a los muros, las cuales servirán para disminuir las

filtraciones, separar los anillos y rigidizar la estructura, cada columna tendrá una altura de 3 m (figura 7).

- e) El procedimiento expuesto, será continuado hasta la profundidad de proyecto, para colar la losa de fondo, se procede a retirar los lodos que están dentro de la lumbrera y a limpiar el azolve del fondo de la lumbrera, se cuela la losa de fondo, anclándose de manera adecuada a los muros verticales (figura 7).

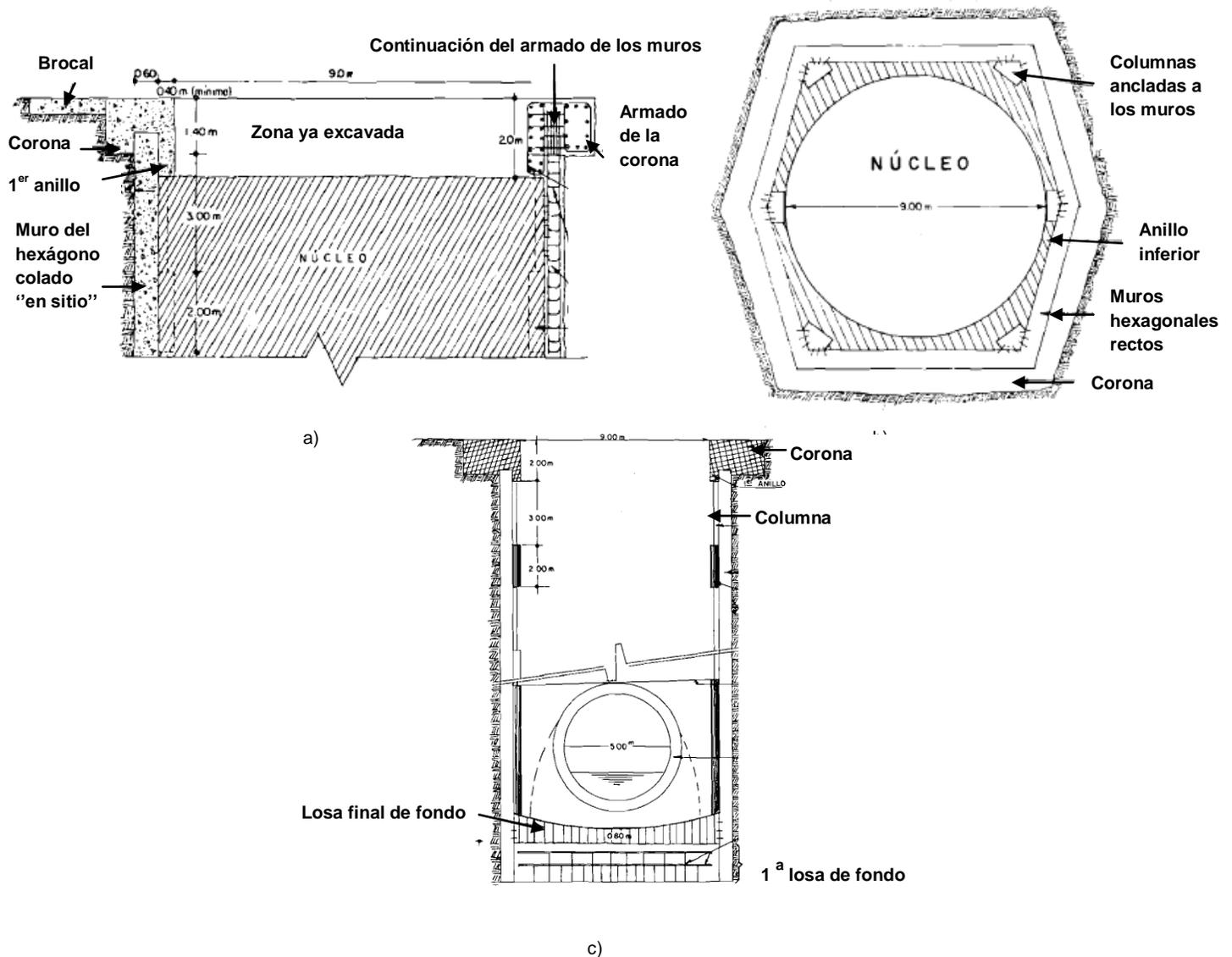


Figura 7. Técnica *Icos*, a) Colado de corona y anillo, b) Colocación de columnas en las esquinas del hexágono, c) Colado de losa fondo. ¹²

2.7.3 Técnica de anillos prefabricados¹³

El procedimiento inicia con la construcción del brocal, en éste deben de dejarse ahogadas placas metálicas, las cuales soportarán los materiales y equipos de construcción, así como uno o varios anillos en suspensión, al terminar la construcción del brocal se inicia la excavación del núcleo central, sirviendo el brocal como guía en estos trabajos, la estabilización de la excavación se realiza por medio de lodos bentoníticos (figura 8).

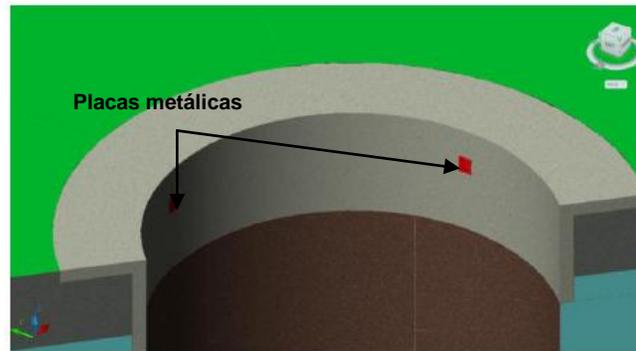


Figura 8. El brocal exterior con placas metálicas ancladas.¹³

Simultáneamente a los trabajos descritos, se fabrican en el sitio de obra o en planta los anillos prefabricados.

Al terminar la excavación del núcleo central se limpia de azolve el fondo de la excavación y se instalan las trabes-guías verticales, fijándolas en las placas metálicas colocadas en el brocal.

El primer anillo se suspende al interior de la excavación por medio de las trabes-guías, el anillo debe colocarse ligeramente por arriba del fondo (figura 9).

El primer anillo instalado se refuerza con una estructura metálica con trabes radiales tipo estrella, la cual servirá de refuerzo a la losa de fondo de la lumbrera, la cual es colada por medio de un grupo de tubos tremie (figura 9).

¹³ Auvinet, Zemva, 2do Simposio Internacional sobre túneles y lumbreras en suelos y roca, Construcción de lumbreras con anillos prefabricados en arcillas blandas del Valle de México, México 2012

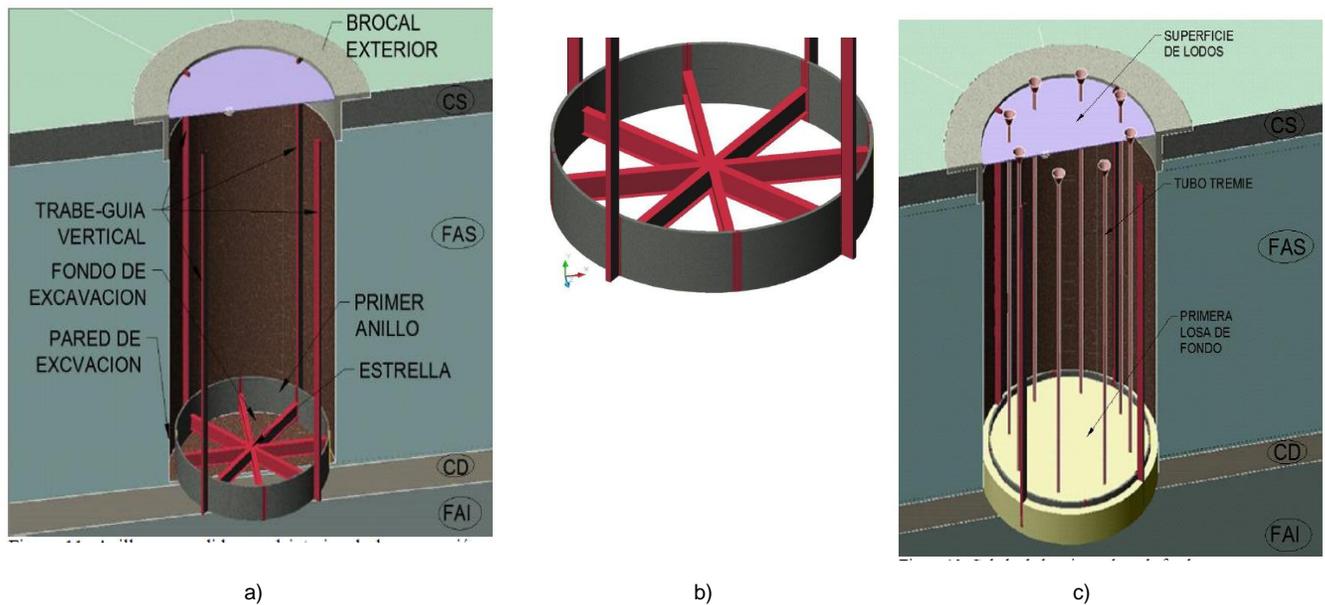


Figura 9. a) Trabes-guías instaladas, b) Refuerzo tipo radial en primer anillo, c) Colado de losa fondo.¹³

El colado de la losa de fondo rigidizará la estructura metálica para proceder a instalar los anillos superiores, lo cual se llevará a cabo al momento de alcanzar el concreto de la losa un 80% de su resistencia de diseño a la compresión (figura 10).

Dentro de las zonas donde cruzará el túnel, los anillos prefabricados se construirán preferentemente de mortero.

La siguiente actividad, es el relleno del espacio anular entre los anillos y las paredes de la excavación de la lumbrera, el relleno se realizará con mortero de alta fluidez o con mezcla bentonita-suelo-agua. Este relleno deberá alcanzar la resistencia necesaria para constituir, en combinación con los anillos prefabricados, el revestimiento primario de la lumbrera (figura 10).

Cuando el relleno perimetral desarrolle la resistencia de diseño, se retiran los lodos del interior de la excavación. En este momento se construye el revestimiento definitivo en condiciones secas, con los métodos tradicionales ya conocidos.

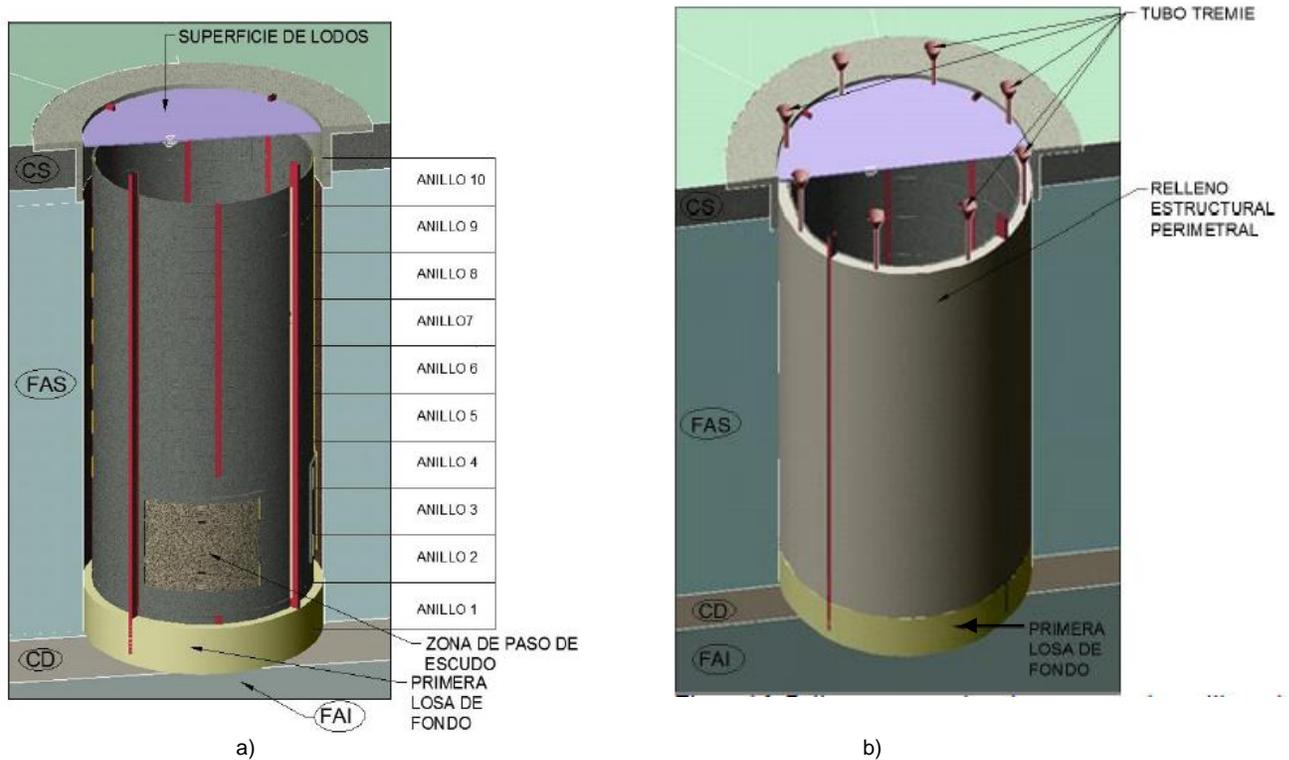


Figura 10. a) Instalación de anillos superiores, b) Colado de espacio anular.¹³

2.8 Antecedentes en las técnicas de construcción de muros Milán¹⁴

Los muros-diafragma colados en el lugar o muros Milán, son paredes de concreto colado en trincheras estabilizadas con lodo.

Los muros Milán, son particularmente útiles en obras que se realizan en espacios limitados por zonas urbanas, en donde no se permiten los altos niveles de ruido y vibraciones ocasionadas por el hincado de tablestacas o pilotes, en excavaciones en las que se requiere el abatimiento del nivel freático limitado y controlado para no inducir efectos negativos por bombeo y en consecuencia fenómenos de pérdida de presión de poro y hundimientos diferenciales, con daños de las estructuras aledañas a la excavación. Asimismo, son muy útiles en excavaciones que presentan paredes verticales.

Los principales usos de estos muros son los siguientes:

- Como estructura de retención en excavaciones

¹⁴ CNA, Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento, Geotecnia en construcción especializada, México, Diciembre 2007.

- Como elementos de lastre para contrarrestar la subpresión a la que pueden estar sometidos los cajones de cimentación.
- Como elementos de capacidad de carga en cimentaciones profundas.
- Como pantallas plásticas impermeables.
- Como estructuras aislantes de ruido y vibración.
- Se le utiliza en la construcción de pasos a desnivel, lumbreras, estacionamientos y bodegas subterráneas

2.8.1 Técnicas de construcción de muros Milán

La ejecución del muro colado *in situ* consta de las operaciones siguientes:

- Construcción de muro guía
- Excavación de tramos de zanja estabilizada con lodo
- Colocación de armados
- Juntas con tubos metálicos
- Vaciado del concreto con tubería tremie

Construcción de muro-guía (pre-trinchera) o brocales

Esta estructura tiene de 1 a 1.5 m de altura y un ancho ligeramente superior al del futuro muro y, por lo general es de concreto armado o acero. Entre sus funciones se cuenta la de guía para el proceso de excavación, sirve de apoyo para las maniobras, asegura la estabilidad del suelo en la superficie, sirve de sustento cuando los suelos superficiales presenten problemas de estabilidad (figura 11).

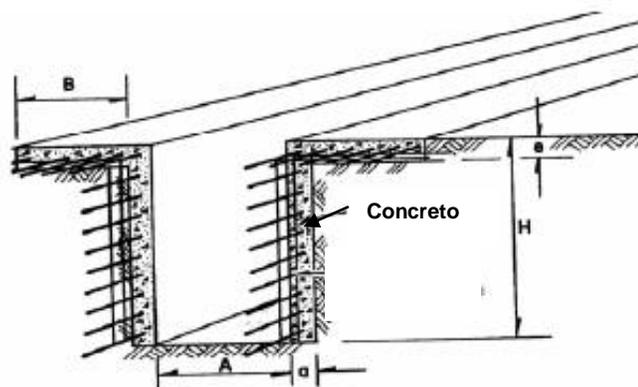


Figura 11. Brocal del muro Milán.¹⁴



Excavación de tramos de zanja

Desde el inicio de las excavaciones se debe sustituir el suelo por lodos para evitar el cierre de las paredes de la zanja, al sacar la herramienta de corte debe evitarse la caída del material excavado al interior de la zanja y dejar escurrir el lodo sobrante al interior de ésta. Un aspecto importante en la excavación es cuidar la verticalidad de la herramienta de perforación, con el fin de garantizar la verticalidad del muro. No se debe dejar la trinchera totalmente excavada y estabilizada por más de 24 horas, antes de colar el muro.

Se utilizan diferentes equipos según los terrenos y las especificaciones: retroexcavadora, almeja con cable, almeja con kelly e hidrofresa. Los anchos varían de 0.50 a 1.50 m. Un equipo kelly puede alcanzar los 65 m, y la hidrofresa más de 100 m. Se construyen generalmente paneles yuxtapuestos: primero de orden impar y luego de orden par. La dimensión de los paneles elementales varía de 2 a 20 m; comúnmente la longitud es de 5 a 6 m. Las formas más sencillas en trazado en planta son las mejores para la calidad del trabajo terminado

Selección de equipo

Almejas libres auto-guiadas: Estos equipos fueron de los primeros que se desarrollaron con el objetivo específico de excavar zanjas profundas. Están integrados por dos quijadas operadas por medio de cables y un cuerpo metálico que le sirve de guía para mantener el alineamiento y la verticalidad durante la excavación; generalmente están montadas sobre dragas. Tienen la característica de que pueden alcanzar grandes profundidades ya que sólo dependen de la longitud de los cables que pueda manejar la grúa. El diseño racional de una excavación con almeja libre o autoguiada debe tomar en consideración los siguientes aspectos:

- Tipo de suelos por excavar.
- Peso de la almeja, abertura de las quijadas, posición y tipo de los dientes de ataque, empleo de cables adecuados.
- Libre paso del fluido empleado para estabilizar las paredes de la excavación a través de la almeja.
- Longitud del cuerpo guía para garantizar la verticalidad y mecanismo de descarga y limpieza de las quijadas.
- Para su operación se requiere de brocales que le sirvan de guía.

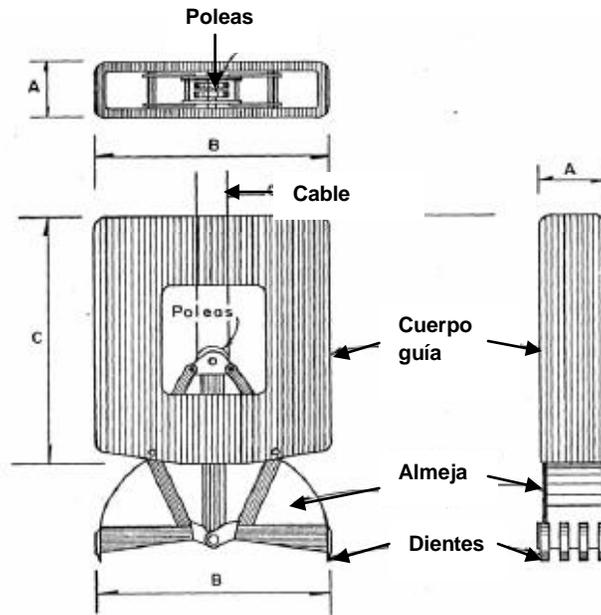


Figura 12. Almeja libre autoguiada operada con cables.¹⁴

Colocación de armados

Los aceros especiales y verticales deben dejar entre sí un espacio libre de 10 a 15 cm para el paso del concreto. Con la finalidad de garantizar una buena cobertura lateral, los armados deben tener un ancho inferior al de la pared en unos 10 cm. aproximadamente. Son necesarios centradores (rodillos o patines) y elementos de izado (asas, rigidizadores) para manipular y posicionar la armadura. Una vez colocada la parrilla se debe amarrar al brocal por medio de unas orejas, para evitar su flotación durante el colado.

Vaciado del concreto (colado)

El concreto para un muro Milán no se vibra nunca. Se hace el colado con una tubería tremie (columna de vaciado o trompa) bajo agua o lodo. La operación de vaciado no debe ser interrumpida y debe hacerse en una sola operación

Juntas

En la siguiente figura se observa un croquis de los elementos que comúnmente se emplean para moldear las juntas de los tableros del muro Milán, para lograr el machihembrado entre ellos. Son piezas generalmente metálicas que constan de un cuerpo tubular de sección rectangular, de ancho igual al muro Milán, que sirve de respaldo y rigidizador de la parte de la junta que deja una huella en el concreto del tablero.

Esta parte es trapezoidal y en algunos casos tiene un pequeño canal para alojar una banda de PVC usada como sello entre tablero y tablero. Se aclara que estas juntas se emplean en tableros alternados. Se instalan inmediatamente después de terminar la excavación y antes de que se coloque el acero de refuerzo. Su extracción debe realizarse al concluir el colado; Es importante determinar el momento en que es conveniente moverlas, tomando en consideración el fraguado del concreto ya que pueden quedar atrapadas cuando el concreto se endurece o bien provocar que el concreto fluya hacia el hueco que deja la junta cuando se le levanta, si aún no tiene la resistencia adecuada.

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.

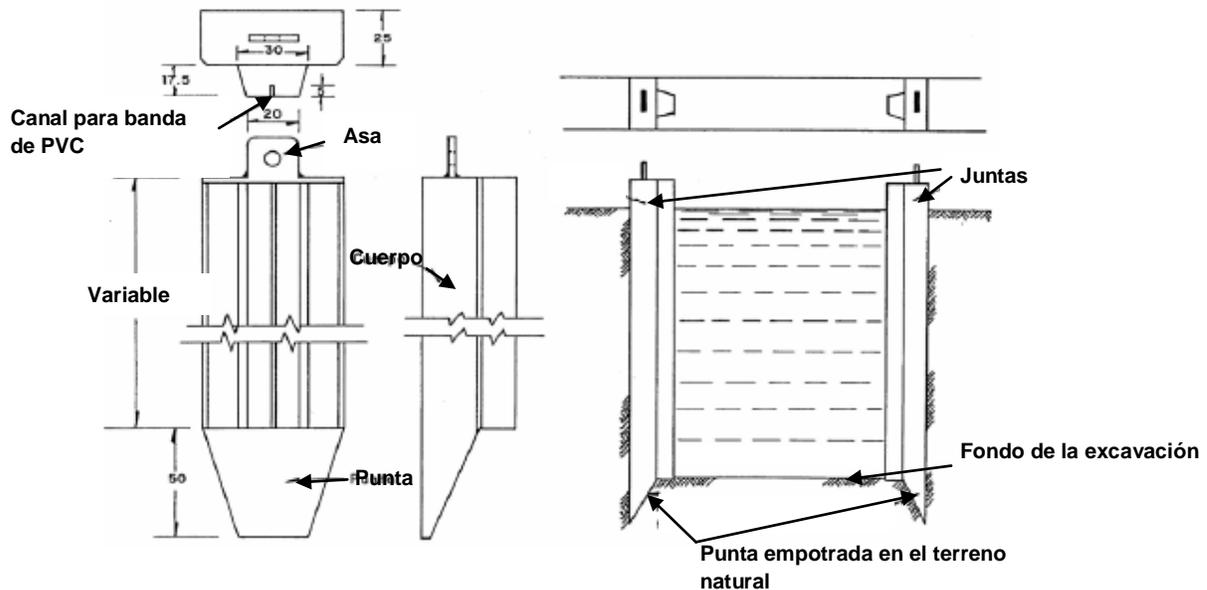


Figura 13. Junta de muro Milán.¹⁴

Controles

Durante las operaciones antes citadas, debe prestarse atención a los siguientes puntos:

- Excavación: nivel y calidad del lodo, verticalidad y espesor de la trinchera.
- Colocación de las armaduras: centrado y altura.
- Vaciado: calidad del concreto, volumen a cada nivel.
- Juntas: verticalidad y posición de los tubos-junta.
- Continuidad: encaje de los paneles primarios y secundarios.

3.0 Geología

3.1 Fisiografía

La lumbrera 20 del TEO se localiza en la Provincia Fisiográfica del Eje Neovolcánico que constituye una franja volcánica que cruza transversalmente la República Mexicana a la altura del paralelo 20° (figura 14). Se caracteriza en términos generales por la presencia de una gran cantidad de aparatos volcánicos asociados en su mayor parte a fracturas regionales.



Figura 14. Provincia Fisiográfica del Eje Neovolcánico¹⁵

¹⁵ <http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/espanol/datosgeogra/basicos/fisiografia/provincias.gif>



3.2 Marco geológico regional¹⁶.

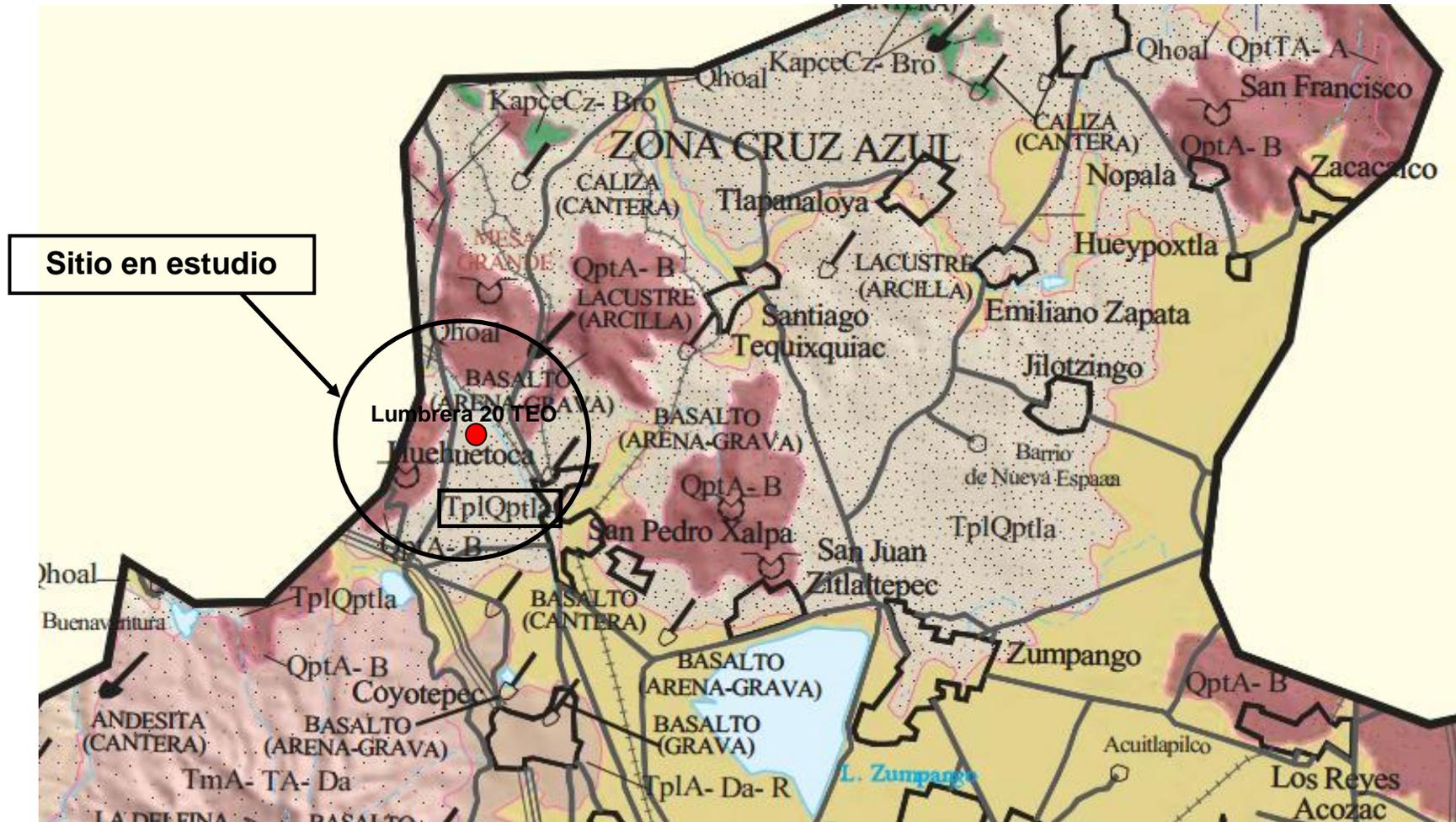
Esta región está constituida predominantemente por rocas volcánicas terciarias y cuaternarias (brechas, tobas y derrames riolíticos y andesíticos), de composición y textura variada, las cuales forman en conjunto un extenso y grueso paquete.

Este conjunto ha sido superpuesto a las rocas sedimentarias mesozoicas por los fenómenos de vulcanismo. De estas últimas se encuentran algunos afloramientos que sobresalen en forma de cerros aislados en medio del dominio de las rocas ígneas.

La morfología de esta provincia es variada, se presentan diversos tipos de estructuras volcánicas bien conservadas, como son: conos cineríticos, volcanes compuestos, volcanes de escudo y calderas, además de extensos flujos piroclásticos y derrames lávicos basálticos, que tienen forma de mesetas y planicies sobre las que se han originado algunos lagos, debido al cierre de las cuencas.

La interacción entre el clima y la composición litológica de las rocas volcánicas se hace más evidente en las zonas húmedas, donde afloran extensos derrames de rocas basálticas que han sido alteradas profundamente por el intemperismo fisicoquímico y han desarrollado suelos residuales, de color rojizo, que indican una fuerte oxidación de minerales férricos contenidos en las rocas ígneas y en el agua.

¹⁶ <http://mapserver.inegi.org.mx/geografia/espanol/estados/hgo/geolo.cfm?c=444&e=23>

3.3. Geología local del sitio de la L20¹⁷Figura 15. Carta Geológica-Minera, Estado de México.¹⁷

¹⁷ Secretaría de Economía, http://portaljsp.sgm.gob.mx/cartas_impresas/productos/cartas/estados/geologia/pdf/df_mex_morelos.pdf



3.3.1 Unidades litoestratigráficas

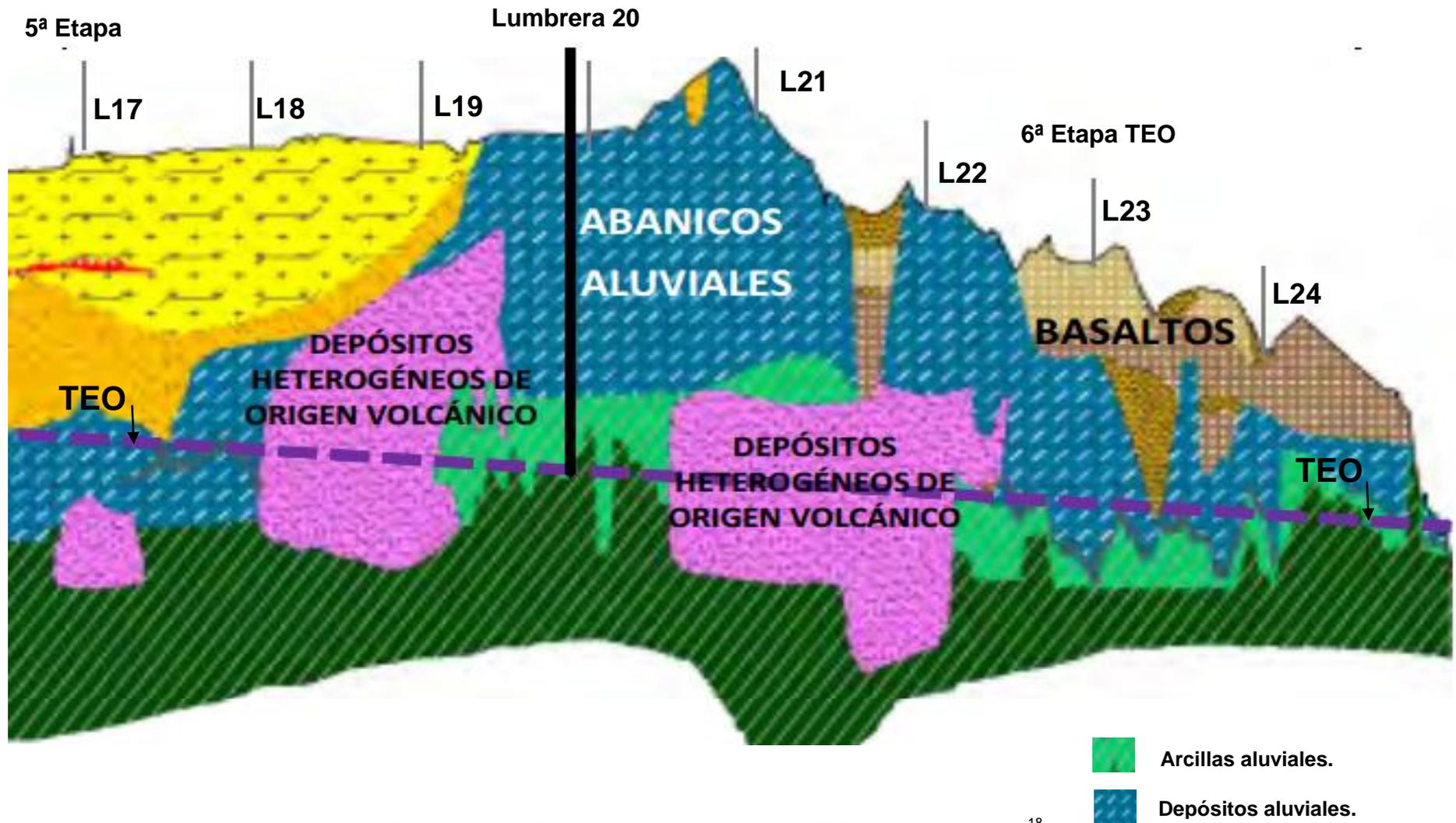
TpIQptla

Abanicos aluviales formados por mezclas e intercalaciones de arcillas, limos y arenas provenientes de la desintegración de rocas volcánicas pre-existentes. Dentro de su mineralogía destaca el cuarzo, los feldespatos y los ferromagnesianos, la presencia de materia orgánica es poca y predominan los materiales con una mayor consolidación (ver sección geológica L20, figura 16).

En la zona de estudio afloran depósitos de suelo residual, que son el producto de la desintegración de las unidades volcánicas pre existentes, en especial materiales tobáceos del Plioceno (TpIA).

Los depósitos piroclásticos del Plioceno se caracterizan por ser tobas líticas de composición andesítica a riolítica e ignimbritas. En los alrededores de la lumbrera, se encuentran domos volcánicos y antiguos volcanes que pertenecen a la evolución tectónica de esta parte de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM). Dichas estructuras están compuestas por derrames que varían de composición de basáltica a andesítica y edades que van desde el Mioceno hasta el Holoceno.

3.3.2 Sección geológica de la L20

Figura 16. Perfil Geológico de la lumbrera 20 y del TEO en las 5ª y 6ª etapas¹⁸

¹⁸ Aguilar-Téllez M.A., Rangel-Núñez J.L., Mooser Hawtree F., Jornada Técnica Túneles en México, Geotecnia del Túnel Emisor Oriente, Barcelona, junio 2011.



4.0 Exploración Geotécnica

4.1 Objetivos¹⁹

4.1.1 Objetivos generales

La exploración geotécnica de un sitio consiste en realizar sondeos, recuperar muestras y ejecutar pruebas de campo y de laboratorio, con el propósito de poder determinar las propiedades físicas, el comportamiento del subsuelo y resolver los problemas geotécnicos derivados de la modificación de las condiciones iniciales del mismo.

Los conceptos básicos primordiales que debe aclarar una exploración geotécnica son los siguientes:

- Estratigrafía del sitio: se determina mediante la exploración geofísica y se precisa con sondeos directos.
- Parámetros mecánicos: se obtienen de los ensayos de laboratorio y de pruebas de campo.
- Niveles piezométricos: es la determinación de la distribución de la presión de agua del subsuelo.

4.1.2 Objetivos específicos

Los objetivos específicos de una exploración geotécnica son:

- Definir el marco geológico del sitio para interpretar los tipos de rocas y depósitos de suelos que se podrán encontrar.
- Definir la campaña de sondeos por realizar, debe rescatar las muestra alteradas e inalteradas que permitan en campo y laboratorio identificar rocas y suelos a distintas profundidades.
- Identificar en campo la estratigrafía del lugar.
- Investigar la influencia del hombre en el sitio, por ejemplo: espesor de rellenos, extracción de materiales térreos, deforestación, etc.
- Realizar las pruebas de campo “in situ” que se enfocan a determinar propiedades mecánicas de rocas y suelos.
- Determinar la posición del Nivel de Aguas Freáticas (NAF).

¹⁹ Enrique Santoyo, XXV Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica, Decimotercera Conferencia Nabor Carrillo, Exploración y muestreo de suelos, Acapulco Guerrero, 2010.



4.2 Métodos indirectos de exploración²⁰

4.2.1 Exploración geofísica

Los métodos de exploración Geofísica en Geotecnia, se basan en la variación de la velocidad de propagación de ondas sísmicas o de la resistividad eléctrica de los suelos y mediante la interpretación de sus correlaciones se determinan las características estratigráficas, posición del NAF y las posibles propiedades de los suelos y rocas.

Sondeos Eléctricos Verticales (SEV)

Ésta técnica consiste en separar sucesivamente los electrodos de corriente A y B del punto central siguiendo una línea recta y medir la resistividad aparente en cada posición; la resistividad aparente calculada sería por tanto, la correspondiente a mayores espesores según se van separando los electrodos, el equipo consiste de una fuente de poder, voltímetro, amperímetro y cuatro electrodos.

Se han desarrollado varias técnicas, entre ellas las más utilizadas por su sencillez es el arreglo de *Wenner*, la cual utiliza un arreglo con líneas de observación sobre el terreno en estudio, el resultado que se obtiene del SEV es la variación de la resistividad (ρ) con la profundidad del punto central del perfil estudiado.

4.2.2 Resultados de exploración geofísica (L20)

Se realizó el levantamiento SEV dentro del área en estudio, con una separación máxima entre electrodos de corriente AB/2 de 250m. Con esta información se determinó una interpretación geológico-geofísica del sitio de la lumbrera, en la cual se incluyen los espesores de las unidades geoelectricas y sus propiedades físicas, interpretadas con base en el valor de su resistividad, determinándose las siguientes unidades litológicas.

²⁰ Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, Manual de Construcción de Cimentaciones Profundas, 2001.



Unidades Litológicas	Unidades geológicas	Resistividad (Ω m)	Espesor (m)
Depósitos aluviales intercalados con suelos residuales constituidos por arcillas, limos y arenas	U1	13-53	0-9
	U4	5-16	5-140
	U4a	13	5-140
Depósitos aluviales constituidos por arcillas plásticas, conglomerados y areniscas, con algunas interfaces de cenizas.	U5	5	Indefinido

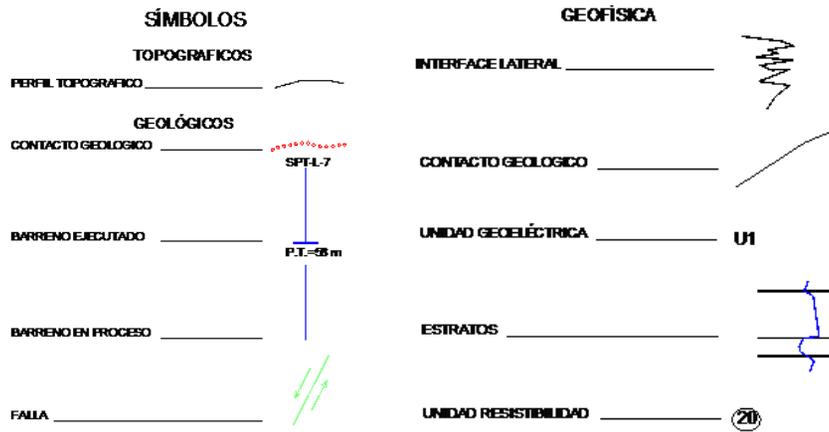
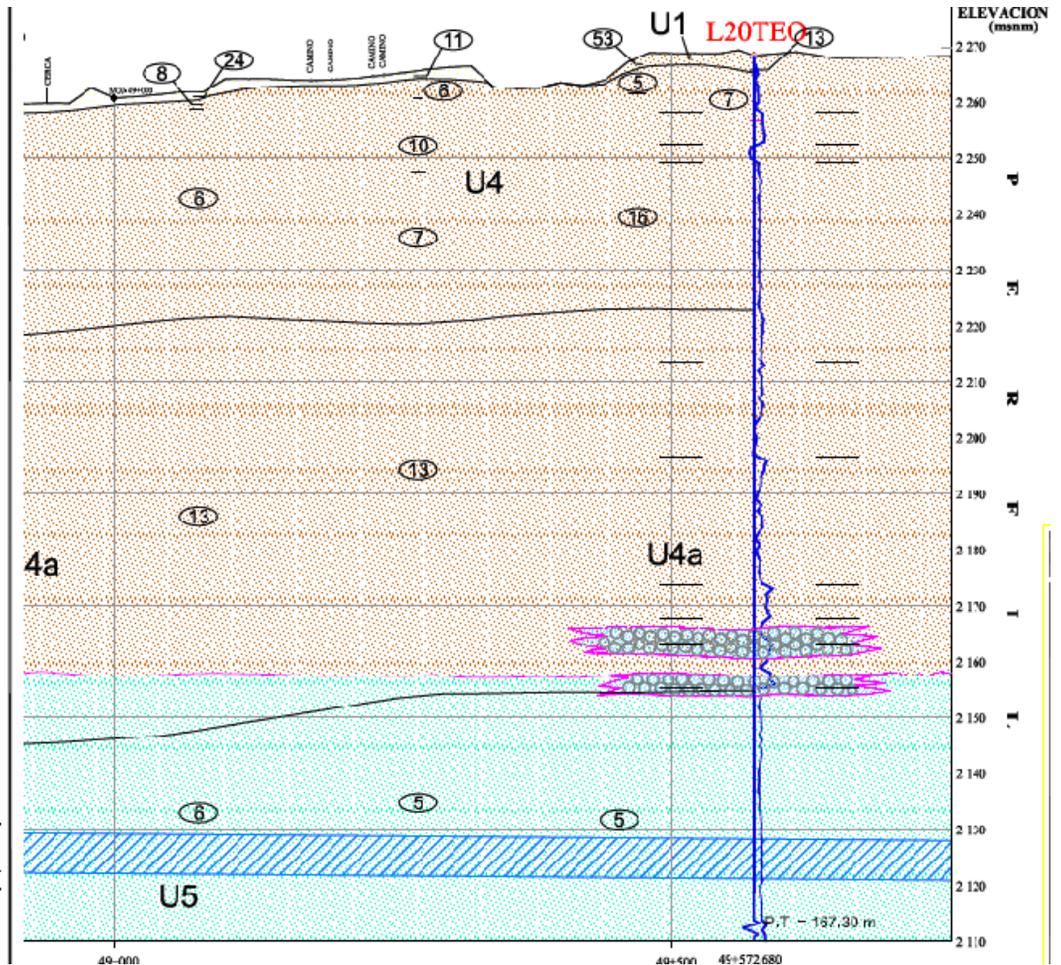


Figura 17. Resultados del SEV realizado en la lumbrera 20.²¹

²¹ CFE, Estudio de factibilidad técnica e ingeniería básica para la elaboración del proyecto ejecutivo y la construcción del Túnel Emisor Oriente, ubicado en el Distrito Federal y los estados de México e Hidalgo.

Integración de la información geotécnica a nivel de ingeniería básica para el proyecto de la lumbrera 20, Túnel Emisor Oriente, México, 2009



4.3 Programa de exploración directa

El propósito principal del programa de exploración es determinar la estratigrafía y las propiedades mecánicas de los suelos del sitio de la obra, entre las principales propiedades por definir, se enumeran las índice, mecánicas e hidráulicas.

Como paso preliminar al programa de exploración se recopiló la información geológica del área de estudio, se realizaron recorridos por la zona y se ejecutó el SEV, el procesamiento de ésta información indica la presencia de potentes depósitos de origen aluvial constituidos por limos y arcillas con posibles intercalaciones de depósitos heterogéneos de origen volcánico. El programa debe ser planificado de tal manera que la cantidad máxima de información pueda obtenerse a bajo costo. Dado la naturaleza de los materiales, se determinó la ejecución de un sondeo de Penetración Estándar (SPT), ya que éste tipo de sondeo es recomendable para materiales de consistencia dura, con base en los resultados e interpretación del SPT se realizó un Sondeo Selectivo (SS) (extracción de muestras inalteradas), en las profundidades seleccionadas para el estudio de sus propiedades.

En la siguiente tabla se muestran las aplicaciones generales de los sondeos seleccionados:

Tabla 3. Tipos de sondeos y sus aplicaciones generales²²

	Clasificación del suelo	Determinación de la estratigrafía	Densidad relativa, D_r	Ángulo de fricción interno, ϕ	Esfuerzo cortante no drenado, S_u	Presión de poro, u	Historia de esfuerzos, OCR y k_0	Compresibilidad, M_v y C_c	Módulos, E y G	Consolidación, C_h y C_v	Permeabilidad, k	Potencial de licuefacción
Prueba de Penetración Estándar (SPT)	1	1	1	2	2	-	-	-	2	-	-	2
Extracción de Sondeos Selectivos (SS)	1	-	1	1	1	-	1	1	1	1	1	-

1 Resultados directos, 2 Resultados obtenidos por medio de correlaciones.

²² J.Bowles, Foundation analyses and desing, USA 2002

4.4 Exploración geotécnica directa en L20

4.4.1 Prueba de Penetración Estándar (SPT)²³

La prueba de Penetración Estándar es una técnica de exploración geotécnica que consiste en el hincado de un penetrómetro a percusión, éste es un tubo muestreador con el que se rescatan muestras alteradas para identificar a los suelos y realizar pruebas índices.

El número de golpes necesario para hincar al muestreador se correlaciona con la resistencia al esfuerzo cortante.

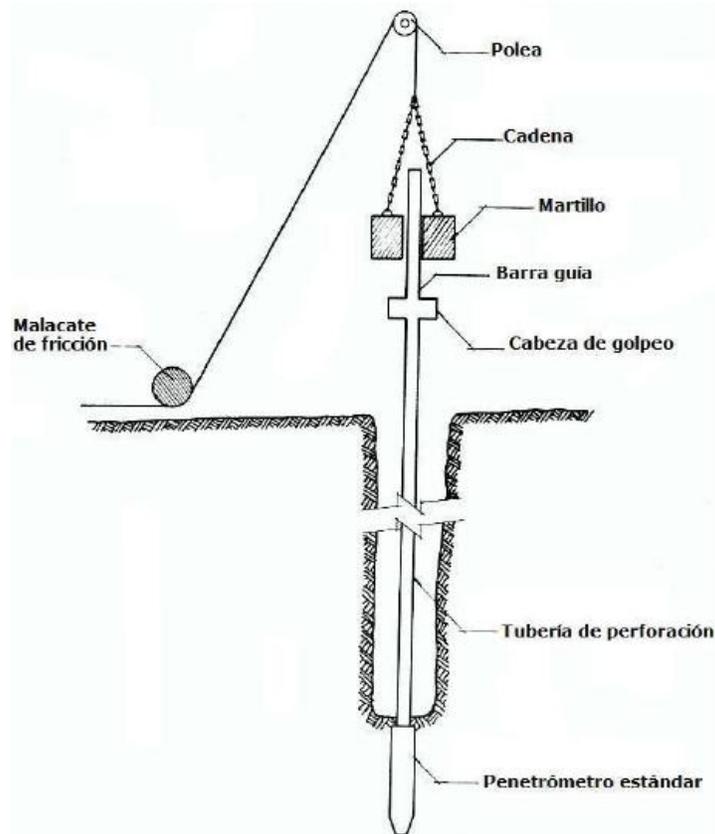


Figura 18. Esquema general del equipo necesario para realizar un ensayo SPT ²⁴

²³ J. Bowles, Foundation analyses and desing, USA 2002, CFE, Manual de diseño de obras civiles, México, 1978.

²⁴ CFE, Manual de diseño de obras civiles, México, 1978.



Sondeo SPT en la lumbrera 20²⁵

En el caso particular de la lumbrera 20, se ejecutó un sondeo de Penetración Estándar (SPT), usando la metodología descrita en las normas de referencia, realizando la perforación hasta 165m de profundidad. La secuencia de perforación consistió en la recuperación de muestras alteradas y la obtención de la resistencia en número de golpes (N_{SPT}), la localización del SPT se muestra en la figura 2 del Anexo.

En los sondeos SPT se utilizó bentonita como fluido de perforación, utilizando un equipo de perforación tipo Mobil Drill montado en camión.

Resultados e interpretación

Con los datos obtenidos de la prueba de Penetración Estándar se detectaron en su mayoría suelos finos con algunas intercalaciones de arena fina y roca de origen volcánico, los suelos presentan una resistencia media mayor que 30 golpes, que indican materiales muy competentes, ésta clasificación se basa en las tablas que presentaron Terzaghi y Peck en 1968, en las cuales correlacionan los valores de N, la consistencia y la compacidad relativa (Tablas 4 y 5).

Tabla 4. Correlaciones entre N, q_u y la consistencia²⁶

Consistencia	Muy blanda	Blanda	Media	Firme	Muy Firme	Dura
N	2	2-4	4-8	8-15	15-30	30
q_u (kg/cm²)	0.25	0.25-0.5	0.50-1.0	1.0-2.0	2.0-4.0	4.0

²⁵ CFE, Estudio de factibilidad técnica e ingeniería básica para la elaboración del proyecto ejecutivo y la construcción del Túnel Emisor Oriente, ubicado en el Distrito Federal y los estados de México e Hidalgo.

Integración de la información geotécnica a nivel de ingeniería básica para el proyecto de la lumbrera I20, Túnel Emisor Oriente, México, 2009

²⁶ Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, Manual de cimentaciones profundas, México, 2001



Tabla 5. Correlaciones entre N y la compacidad relativa²⁵

Numero de golpes	Compacidad relativa
0-4	Muy suelta
4-10	Suelta
10-30	Media
30-50	Densa
>50	Muy Densa

De acuerdo con la clasificación de los suelos realizada a las muestras recuperadas, la zona que comprende la lumbrera 20 está integrada en su capa superficial por una costra superficial desecada, compuesta principalmente por arcilla limosa con poca arena fina café obscura de aproximadamente 1.00 m de espesor, a ésta le subyace un limo duro cementado de origen lacustre, color café oscuro, con distintos contenidos de arena, presenta principalmente alta plasticidad, detectándose este material hasta una profundidad aproximada de 101 m, dentro de esta unidad se detectó un lente de arena pumítica de colores café amarillento y café oscuro, a una profundidad media de 17 a 21 m y varios lentes de arena fina limosa a distintas profundidades, subyaciendo al limo se detectó una arcilla dura o lutita de origen lacustre, color gris verdosa oscura, con poca arena, de alta plasticidad, dentro de este material se localizaron dos lentes de conglomerado a una profundidad aproximada de 104 a 108 y 112 a 115 m respectivamente, este material se observó hasta la máxima profundidad explorada (170 m).

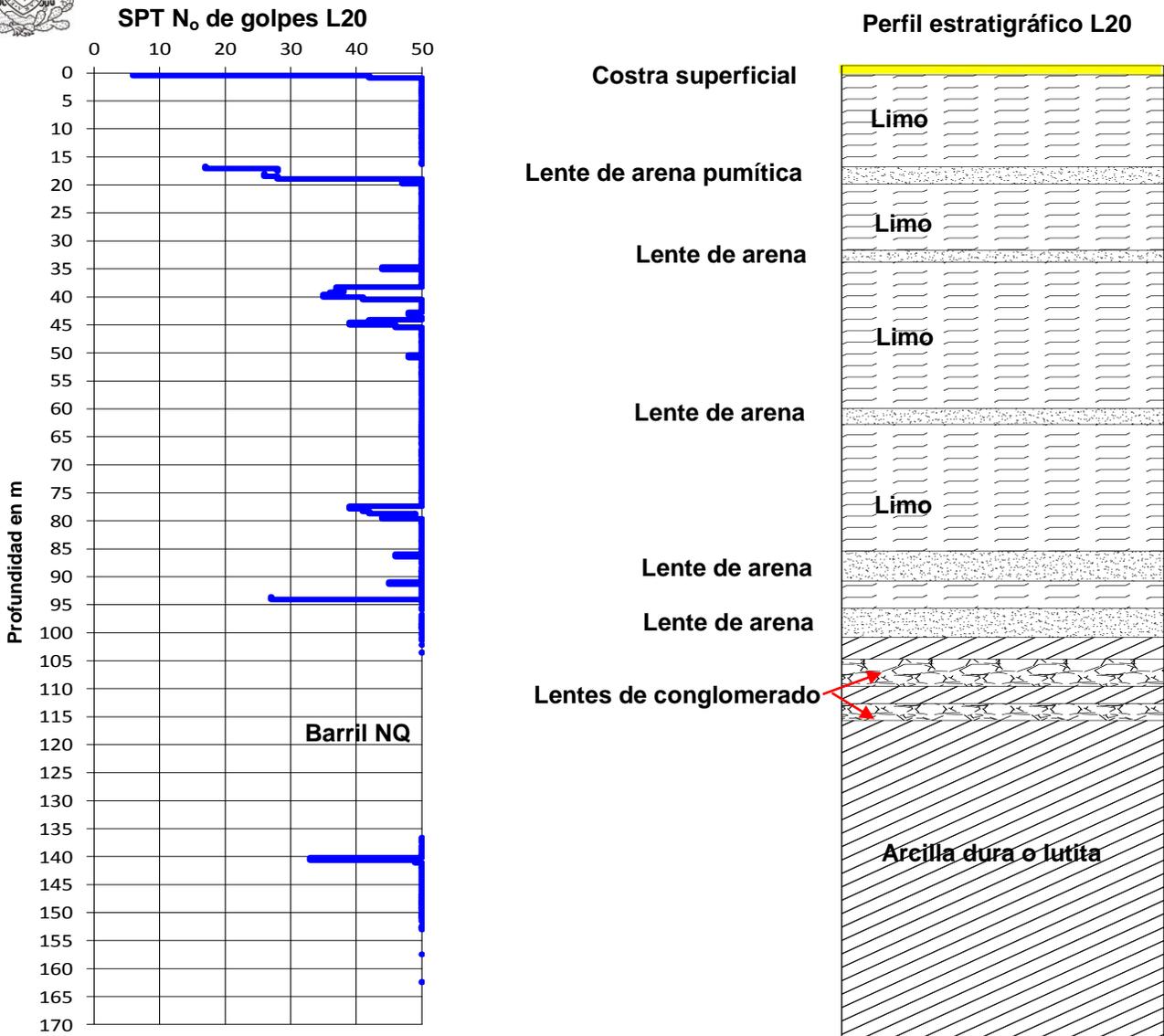


Figura 19. Perfil estratigráfico de la lumbrera 20, obtenido por medio de la prueba de Penetración Estándar.

La herramienta de extracción de muestras entre las profundidades 100 a 135 fue el barril NQ, dado la dureza de los materiales.

Normas de referencia para la prueba de SPT

NMX-C-431-ONNCCE-2002, Toma de muestra alterada e inalterada.

ASTM D1586-00, Standard Test Method for Penetration Test and Split Barrel Sampling of Soils.

LMS-039 “Prueba de Penetración Estándar”, CFE



4.4.2 Sondeo Selectivo (SS)²⁷

En todo proyecto de Mecánica de Suelos de cierta magnitud, es necesario conocer la información relativa a la resistencia al esfuerzo cortante, las propiedades esfuerzo-deformación, permeabilidad, entre otras. Dichas propiedades se determinan por medio de ensayos de laboratorio utilizando muestras de suelo inalteradas.

El grado de alteración de las muestras puede reducir la confiabilidad sobre las propiedades mecánicas de los depósitos en estudio, dicho grado de alteración depende de la técnica utilizada para la extracción, de la pericia de los operadores al realizar éstos trabajos, las dimensiones del muestreador y el manejo del espécimen del campo al laboratorio.

Sondeo SS en la lumbrera 20²⁸

En la lumbrera 20 se ejecutó un sondeo mixto con recuperación de muestras, alcanzando una profundidad aproximada de 167 m.

En lo referente a este sondeo se alternó la técnica de muestreo inalterado descrita en la norma ASTM D1587 con la de Penetración Estándar. Inicialmente el muestreo inalterado se ejecutó mediante tubo Shelby de 10cm de diámetro, cuando los materiales localizados eran más competentes se utilizó el tubo Shelby dentado y por último cuando se encontraron suelos muy duros o roca, el muestreo fue mediante barriles NQ y Denison.

En el sondeo SS se utilizó bentonita como fluido de perforación, empleando un equipo de perforación tipo Mobil Drill montado en camión.

²⁷ CFE, Manual de diseño de obras civiles, México, 1978.

²⁸ CFE, Estudio de factibilidad técnica e ingeniería básica para la elaboración del proyecto ejecutivo y la construcción del Túnel Emisor Oriente, ubicado en el Distrito Federal y los estados de México e Hidalgo.

Integración de la información geotécnica a nivel de ingeniería básica para el proyecto de la lumbrera I20, Túnel Emisor Oriente, México, 2009



Resultados e interpretación

Las muestras inalteradas recuperadas, se trasladaron al laboratorio de Mecánica de Suelos para sus estudios correspondientes, en la tabla siguiente se muestran las longitudes totales de cada tipo de sondeo ejecutado y los metros lineales de cada uno:

Tabla 6. Longitudes de cada tipo de sondeo en la lumbrera 20.

Lumbrera	Profundidad máxima (m)	Sondeo Mixto (SM)		Sondeo Selectivo (SS)
		SPT (m)	NQ (m)	Shelby (m)
L20	167	120.00	47	20

En la figura 20, se muestra la ubicación de las muestras inalteradas recuperadas a lo largo de la lumbrera. En los siguientes capítulos se muestran resultados de las pruebas de laboratorio ejecutadas y los parámetros obtenidos.

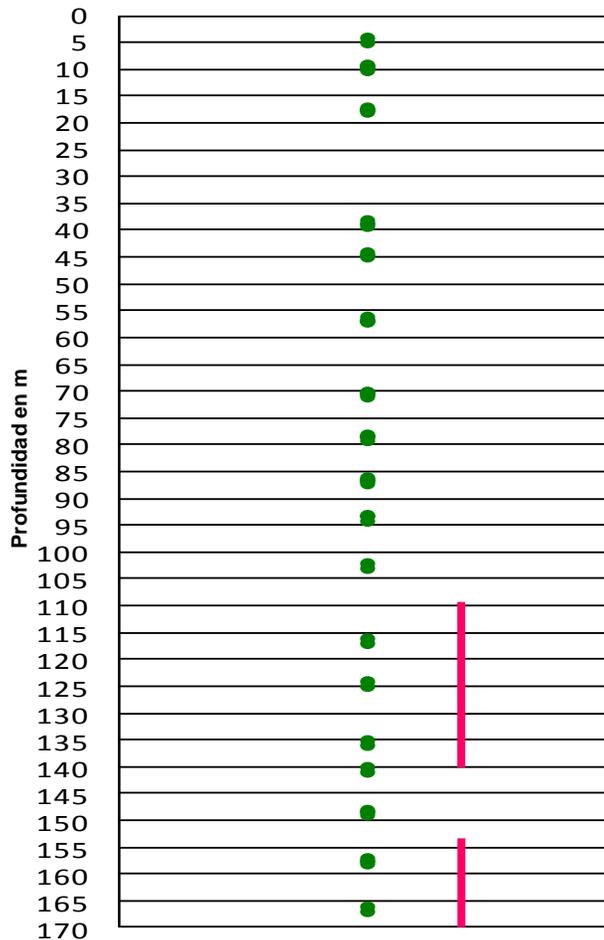
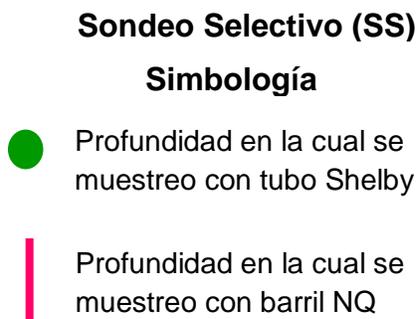


Figura 20. Sondeos selectivos de la lumbrera 20



Normas de referencia para muestreo de suelos con tubos de pared delgada

ASTM D1587 08 Standard Practice for Thin-Walled Tube Sampling of Soils for Geotechnical Purposes

AASHTO T 207 Thin-Walled Tube Sampling of Soils

NMX-C-431-ONNCCE-2002 Industria de la Construcción-Geotecnia cimentaciones- Toma de muestra alterada e inalterada-métodos de prueba.

Normas de referencia para muestreo en rocas con barriles muestreadores

ASTM D2113 - 08 Standard Practice for Rock Core Drilling and Sampling of Rock for Site Investigation

4.4.3 Instrumentación

Ubicación de Piezómetros en Lumbrera 20²⁹

Con la información obtenida de los sondeos ejecutados se instalaron estaciones piezométricas compuestas por cinco piezómetros abiertos tipo Casagrande, ubicados en estratos drenantes (ver figura 4, Anexo).

Adicionalmente se instalaron pozos de observación para monitorear los niveles de aguas freáticas superficiales.

Con estos trabajos se podrán monitorear las variaciones de la presión hidráulica de los estratos seleccionados, desde su instalación, antes, durante y después de la construcción de la lumbrera.

²⁹ CFE, Estudio de factibilidad técnica e ingeniería básica para la elaboración del proyecto ejecutivo y la construcción del Túnel Emisor Oriente, ubicado en el Distrito Federal y los estados de México e Hidalgo



Resultados e interpretación

El nivel piezométrico promedio se estableció a los 65 m de profundidad, observándose que la presión de poro es similar a la hidrostática.

Los niveles piezométricos, el comportamiento de las mediciones realizadas del nivel del agua y el diagrama construido con esta información se muestran en la figura 6 del anexo.



5.0 Trabajos de laboratorio

Las muestras obtenidas durante los trabajos de exploración se etiquetaron, protegieron y trasladaron al laboratorio de Mecánica de Suelos, donde de acuerdo con las características del proyecto y de los materiales detectados, se realizaron las pruebas y los análisis correspondientes, el resumen de las pruebas realizadas y su normatividad vigente se integran en la tabla 1³⁰ del anexo.

Con las pruebas ejecutas se obtuvieron parámetros de las propiedades índices y mecánica. Las primeras son útiles para identificar y clasificar un suelo cualitativamente; las segundas, se requieren para en el análisis y diseño geotécnico.

Entre las pruebas para determinar las propiedades índice se enumeran las siguientes:

- Clasificación visual y al tacto en estado húmedo y seco
- Contenido natural de agua
- Densidad de sólidos
- Análisis granulométrico
- Límites de consistencia (líquido y plástico)

Con la realización de éstas, clasificamos al suelo dentro del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), definido por A. Casagrande.

En lo que respecta a las propiedades mecánicas se ejecutaron los siguientes ensayos de laboratorio:

- Prueba de compresión simple en probetas de 3.6 y 10cm de diámetro
- Prueba triaxial no consolidada no drenada (UU).

La resistencia al cortante de los suelos se puede medir en el laboratorio o directamente "*in situ*", en el laboratorio los ensayos se realizan sobre muestras de suelo inalteradas y

³⁰CFE, Estudio de factibilidad técnica e ingeniería básica para la elaboración del proyecto ejecutivo y la construcción del Túnel Emisor Oriente, ubicado en el Distrito Federal y los estados de México e Hidalgo



deben efectuarse bajo las condiciones de esfuerzo que simulen mejor las condiciones de campo.

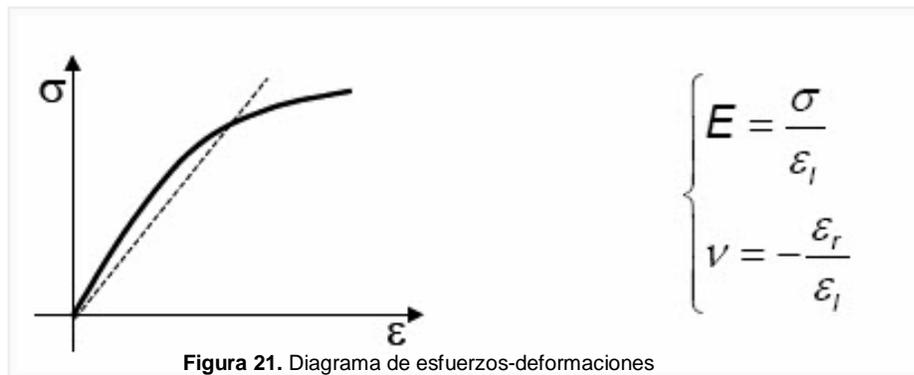
5.1 Pruebas mecánicas realizadas para determinar el esfuerzo cortante y propiedades esfuerzo-deformación en los suelos de la L20.

Prueba de compresión simple

La prueba de compresión simple, también conocida como prueba de compresión no confinada (UC), constituye un ensayo sin esfuerzo de confinamiento y sin drenaje. Es comúnmente usada en suelos arcillosos. La carga axial es aplicada hasta provocar la falla del espécimen. En la falla el esfuerzo principal menor σ_3 es cero y el esfuerzo principal mayor $\sigma_1 = q_u = 2c_u$ (figura 5 del anexo). Según el valor de la resistencia a la compresión simple, q_u , un material arcilloso se puede clasificar del modo indicado en la tabla 2 (anexo).

La carga axial es aplicada en una única dirección, dando libertad al cuerpo de prueba para deformarse en otras direcciones, sin restricción.

Con el registro de los esfuerzos verticales (carga dividida entre el área de la sección transversal) y de las deformación longitudinal, ϵ , obtenemos la siguiente curva:



El suelo no es un material elástico, pero se admite con frecuencia en él un comportamiento elástico-lineal, definiéndose un Módulo de Elasticidad (E) y una relación de Poisson (ν).



Estos dos términos definidos, no son constantes del suelo, sino más bien, magnitudes que describen aproximadamente el comportamiento de un suelo para una combinación particular de esfuerzos.

Prueba triaxial no consolidada no drenada (TX UU).³¹

Este ensaye, presenta la particularidad de que la válvula de drenaje permanece siempre cerrada. En la primera fase se aplica simplemente una presión de confinamiento σ_3 , impidiendo su drenaje.

Si la probeta está saturada, en ausencia de drenaje, toda la presión isotrópica de cámara se transmite al líquido intersticial, y por lo tanto, los esfuerzos efectivos en el suelo no varían. Por ello, aunque se lleven a cabo tres ensayos en tres muestras idénticas y se apliquen tres esfuerzos de confinamiento distinto, los esfuerzos efectivos iniciales son los mismos en las tres muestras, este hecho da lugar a que al realizarse la etapa de corte, también sin drenaje, el esfuerzo desviador de rotura $\Delta\sigma$ resulte siempre el mismo. En dicha etapa, se miden el incremento de esfuerzo vertical total ($\Delta\sigma$) y la deformación axial

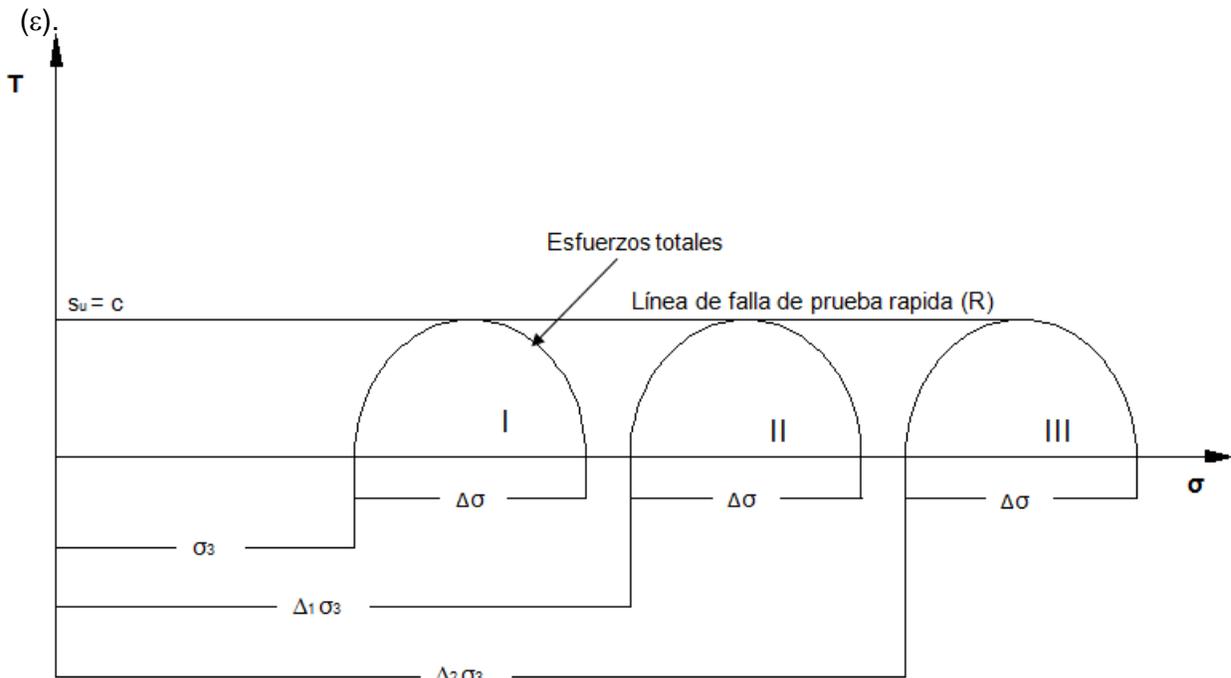


Figura 22. Círculos de Mohr en rotura en un ensayo UU (tensiones totales).

³¹ Gonzales de Vallejo Luis, Ingeniería Geologica, 2004

Rico, Del Castillo, La ingeniería de suelos en las vías terrestres, 1999



En la figura 22, se representan los tres círculos de Mohr en rotura que se obtienen de las probetas ensayadas, están expresados en esfuerzos totales (los únicos que se miden) y muestran el mismo diámetro (el mismo desviador en rotura), siendo una línea horizontal la envolvente de resistencia correspondiente a dichos esfuerzos totales, la intersección de esta línea con el eje de ordenadas se denomina resistencia al esfuerzo cortante no drenado (s_u), valor que corresponde al radio de los círculos, tanto en esfuerzos totales y como efectivos, por lo tanto, representa el máximo esfuerzo cortante movilizado por el suelo, llevado a rotura por corte bajo condiciones no drenadas a partir de su estado de esfuerzos iniciales.

El ángulo de fricción aparente resulta ser cero; Sin embargo, en algunas ocasiones se presenta un ángulo mayor y el esfuerzo desviador aumenta conforme se incrementan los esfuerzos de confinamiento de cada ensaye, esto obedece a que el suelo del cual obtenemos la probetas no se encuentra saturado y por cada aumento de la presión isotrópica de cámara, los vacíos existentes entre las partículas de suelo (en este caso aire) son comprimidos por dicha presión, disminuyendo los vacíos al interior de la muestra.

Bajo estas condiciones las partículas de suelo se encuentran más unidas, incrementándose de esta manera los esfuerzos efectivos y generando una mayor resistencia al deslizamiento bajo cargas externas.

En términos generales, la utilidad de este ensayo radica en su rapidez y sencillez, obviamente no permite conocer los parámetros de resistencia al corte efectivos (c', ϕ') dado que no se mide la presión de poro durante el ensayo. Sin embargo, proporciona el máximo esfuerzo cortante frente a procesos de carga en los que se puedan suponer condiciones sin drenaje.

5.2 Resultados e interpretación

Los ensayos realizados se ejecutaron de acuerdo a la normatividad vigente, los resultados de las pruebas índices y mecánicas se muestran en las tablas 3 y 4, así como en los esquemas del gráfico 1 del anexo.



6.0 Modelo y diseño geotécnico de la lumbrera 20

6.1 Unidades Geotécnicas³²

Costra superficial desecada (CSD).

La unidad está compuesta, principalmente, por arcilla café limosa con poca arena fina, de aproximadamente 1 m de espesor, y consistencia muy firme.

Unidad Geotécnica 1 (UG-1).

Subyaciendo a la CSD se observó la UG-1 formada principalmente por limo duro cementado, de origen lacustre, color café oscuro, con distintos contenidos de arena e intercalaciones de arena media, colores café grisáceo claro y café oscuro. Presenta principalmente, alta plasticidad y resistencia a la Penetración Estándar (SPT) de 35 a mayores que 50 golpes. Se clasifica de acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) como MH, el contenido de agua varía entre 12 y 50 %, presenta un peso volumétrico natural aproximado de 17 kN/m³ y la profundidad media de la unidad se detectó de 1 a 101 m.

Unidad Geotécnica 2 (UG-2).

Subyaciendo a la unidad anterior se detectó la UG-2 formada principalmente por arcilla dura o lutita de origen lacustre color gris verdosa oscura, presenta intercalaciones de conglomerados formados por boleos empacados en limos y arenas; El material de la UG-2 presenta alta plasticidad y resistencia a la Penetración Estándar (SPT) de 35 a mayores que 50 golpes. Se clasifica de acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), como CH. El contenido de agua varía entre 25 y 60%, presenta un peso volumétrico natural aproximado de 18 kN/m³, la unidad se detectó desde 101 m hasta la máxima profundidad explorada (170 m de profundidad).

³² CFE, Estudio de Factibilidad Técnica e Ingeniería Básica para la Elaboración del Proyecto Ejecutivo y la Construcción del Túnel Emisor Oriente (TEO), ubicado en el Distrito Federal y los estados de México e Hidalgo,



El nivel de aguas freáticas (NAF) se detectó a 65 m de profundidad, el esquema del modelo geotécnico de la lumbrera, se muestra en la figura 6 del anexo.

6.2 Propiedades mecánicas del suelo contiguo a la L20

Los parámetros mecánicos se obtuvieron de la ejecución de las pruebas de laboratorio indicadas en el capítulo anterior, ejecutadas en las muestras inalteradas recuperadas en los sondeos selectivos.

Con el comportamiento observado durante la Penetración Estándar (SPT) fue posible optimizar la cantidad de pruebas de laboratorio realizadas en los estratos detectados, cuidando la similitud en características físicas y mecánicas a distintas profundidades, ya que a lo largo de la exploración se detectaron en su mayor parte suelos arcillo-limosos de consistencia firme a muy dura de baja compresibilidad con lentes de arena y boleos empacados en arcilla y limo.

El comportamiento de estos materiales es considerado como no drenado, tomando en cuenta su baja permeabilidad en comparación con el tiempo requerido para completar la excavación. El criterio de falla para éstos materiales, fue el de Morh-Coulomb bajo las pruebas triaxial no consolidada no drenada (TX UU) y de compresión simple (UC).

Los parámetros mecánicos de las UG se determinaron con base en los promedios de los resultados de las pruebas TXUU y CS, con excepción de los valores correspondientes al coeficiente de tierras en reposo (k_0) obtenido por medio de la fórmula de Jacky(1944)³³ y la relación de Poisson, la cual fue determinada con base en la literatura técnica, en las UG denominadas como costra superficial y lente de arena pumítica no fue posible la recuperación de muestras inalteradas. Por motivo de su naturaleza friccionante sus parámetros mecánicos se determinaron correlacionado el número de golpes registrados en la prueba de SPT (N_{SPT}), con la tabla 4 y la figura 7 del anexo que correlacionan los valores de N_{SPT} , q_u y ángulo ϕ .

³³ $k_0=1-\text{sen } \phi$



En la siguiente tabla se presenta el modelo geotécnico de la lumbrera 20 y las propiedades mecánicas determinadas para las condiciones del proyecto.

Tabla 7. Modelo Geotécnico 1 (MG-1) propuesto para la lumbrera 20

Unidad	Descripción	Profundidad (m)		γ_n kN/m ³	s_u kPa	ϕ Grados	E_{50} MPa	K_o	ν
		de	a						
Costra	Costra superficial desecada	0	1	16	200	--	12.5	0.47	0.35
UG-1A	Limo	1	17	17	50	20	12	0.66	0.30
Lente	Arena fina pumítica	17	21	16	-	33	18	0.45	0.28
UG-1B	Limo	21	101	17	150	20	22	0.66	0.30
UG-2A	Arcilla dura o Lutita	101	104	18.5	430	5	120	0.91	0.45
Lente 1	Conglomerado	104	108	20	600	--	200	0.40	0.25
UG-2B	Arcilla dura o Lutita	108	112	17.5	670	13	135	0.77	0.45
Lente 2	Conglomerado	112	115	20	600	--	200	0.40	0.25
UG-2C	Arcilla dura o Lutita	115	167	17.5	480	13	130	0.77	0.45

Donde:

- γ_n Peso volumétrico natural
- s_u Resistencia al esfuerzo cortante no drenado
- ϕ Ángulo de fricción interna
- E_{50} Módulo de elasticidad secante
- K_o Coeficiente de empuje de tierras en reposo.
- ν Relación de Poisson.



6.3 Determinación del método de construcción y estabilización de la L20

Con base en las condiciones estratigráficas y piezométricas del subsuelo del sitio y tomando en cuenta la profundidad máxima de excavación (154 m), se consideró que la lumbrera L20 se construirá con el procedimiento siguiente (figura 6, anexo):

De 0 a 60 m de profundidad, mediante excavación por etapas de 3 m y colocación inmediata de revestimiento de concreto lanzado. Esta longitud se determinó debido a que a partir de esta profundidad, se encuentra el NAF (65 m de profundidad). Se espera que antes de esta profundidad no exista problema de flujo de agua hacia la excavación; sin embargo, será preciso tener disponible equipo para bombeo de achique, si fuera necesario.

De 60 a 152 m, considerando la columna de agua detectada en los bulbos inferiores de la estación piezométrica y con el fin de reducir el flujo de agua durante la excavación, se deberá construir un Elemento de Retención Inferior de concreto (ERI-1), traslapado con el tratamiento de concreto lanzado de la parte superior y que abarcará hasta la máxima profundidad de excavación.

Una de las funciones más importantes del ERI-1 es formar un acuífero confinado en condición atmosférica, en el cual se pueda excavar en seco usando bombeo de achique o abatimiento durante las etapas de excavación.

El método de construcción del ERI-1 podrá consistir en el uso de pilas o pilotes secantes o incluso muro Milán (es recomendable que el colado se realice mediante la técnica del tubo tremie; La excavación del núcleo del suelo en el tramo del ERI-1 se podrá realizar hasta que se finalice la construcción del mismo en toda su periferia, sin embargo, en las siguientes etapas de este trabajo se deberá definir el procedimiento de construcción adecuado para el proyecto en cuestión.



6.3.1 Análisis geotécnicos de la L20³⁴

Las lumbreras son estructuras complementarias en túneles, ya sea para el ingreso y extracción de equipo de perforación, cárcamos de bombeo o como acceso a éste para labores de mantenimiento.

Este tipo de estructuras, se puede realizar recurriendo a varias técnicas entre las que destacan la excavación tradicional en suelos firmes (Moreno,1991) y los métodos de flotación (Auvinet *et al.*, 2001), de anillos (Zemva,2010) y muros Milán (Moreno,1991).

La técnica del muro Milán, que había presentado problemas de extrusión de arcillas en juntas, ha podido ser utilizada nuevamente con un grado de éxito, que depende de la precisión y control en la ejecución. Estas diferentes técnicas, pueden combinarse de diferentes formas.

Para verificar la estabilidad de las lumbreras, es necesaria la revisión de diversos estados límites, entre los que destacan los siguientes (Auvinet,2006, 2010; Tamez *et al.*, 2007):

- a) Estados límite de falla. Los aspectos importantes a considerar dentro de éstos son los siguientes: la estabilidad de las zanjas para colado de paneles de muros perimetrales, la estabilidad de las paredes de la excavación contra falla por cortante general o extrusión local y la estabilidad del fondo de la misma contra falla por cortante o subpresión. En todos los casos es necesario verificar la condición de flotación de la lumbrera terminada. El comportamiento de la lumbrera ante solicitaciones sísmicas debe también ser evaluado.

- b) Estados límite de servicio. Una lumbrera debe construirse sin provocar movimientos indeseables en las construcciones y servicios públicos contiguos.

³⁴Auvinet G.G., Rodríguez R.J.F, Análisis, Diseño, Construcción y Comportamiento de Obras Subterráneas en Suelos, IIUNAM, 2010



6.3.2 Revisión geotécnica de la falla de fondo³⁵

Revisión de la estabilidad del fondo de la excavación por falla general por cortante a lo largo de la lumbrera 20, realizándose por un método de análisis límite. Para el análisis de la estabilidad general del fondo se empleará la siguiente expresión:

$$FS := \frac{S_u \cdot N_c \cdot Fr + \gamma_1 \cdot (D_f - H_p)}{P_v + \Sigma \cdot q \cdot F_c}$$

Donde:

- s_u Resistencia al esfuerzo cortante no drenado que se ubica debajo de la lumbrera, en condiciones no consolidadas no drenadas UU, en kPa.
- N_c Factor de capacidad de carga al nivel de la máxima excavación, que depende de la geometría de la excavación, en este caso B será el ancho de la excavación, L su longitud y D su profundidad (adimensional) (RCDF).
- γ_1 Peso volumétrico ponderado del suelo del nivel de terreno natural a la máxima excavación, kN/m³.
- H_p Profundidad del elemento de retención, en m.
- D_f Profundidad de la excavación (variable en las diferentes etapas), en m.
- P_v Presión total al nivel de la máxima excavación, en kPa.
- q Sobrepresión en la periferia de la excavación (30 kPa) (RCDF).
- F_r Se tomará igual a 0.70 (RCDF).
- F_c Se tomará igual a 1.40 (RCDF).

³⁵ Gobierno del Distrito Federal (GDF), Reglamento de Construcciones del Distrito Federal (RCDF), Normas Técnicas Complementarias para el Diseño de Cimentaciones, México D.F., 2001

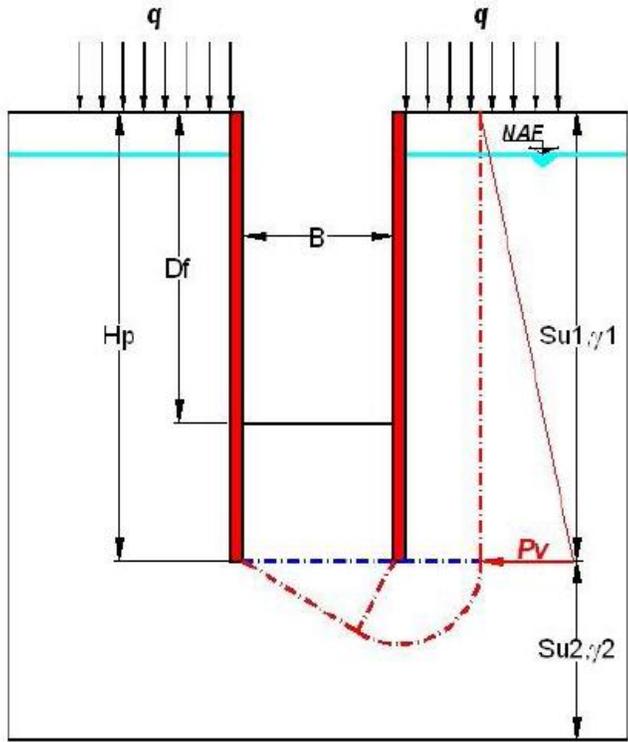
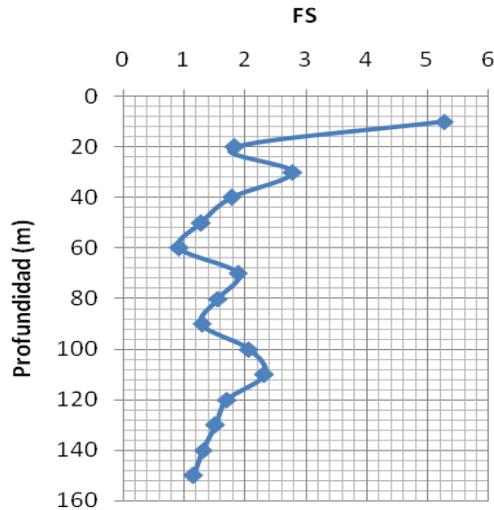


Figura 23. Mecanismo de falla de fondo en la lumbrera 20

La tabla 5 del Anexo contiene los Factores de Seguridad (FS) calculados, el gráfico de estos valores se presenta a continuación y en el cual se observan profundidades susceptibles a la falla de fondo, donde el FS es cercano a la unidad, éstas son 60, 90 y 150 m.



Gráfica 1. FS relativo a la falla de fondo a lo largo de la excavación de la Lumbrera 20



06.3.3 Revisión geotécnica de la subpresión (excavación completa del núcleo)³⁶

La evaluación del FS por supresión se realiza con la siguiente ecuación bajo equilibrio límite:

$$FS := \frac{(H - D_f) \gamma_m}{u}$$

Donde:

- H Profundidad donde inicia el estrato drenante, en m.
- D_f Profundidad de la excavación, en m.
- γ_m Peso volumétrico ponderado del suelo entre el fondo de la excavación al nivel de D_f y el estrato drenante, en kN/m^3 .
- u Presión de agua medida en piezómetros al nivel de la máxima excavación de la lumbrera, en kPa

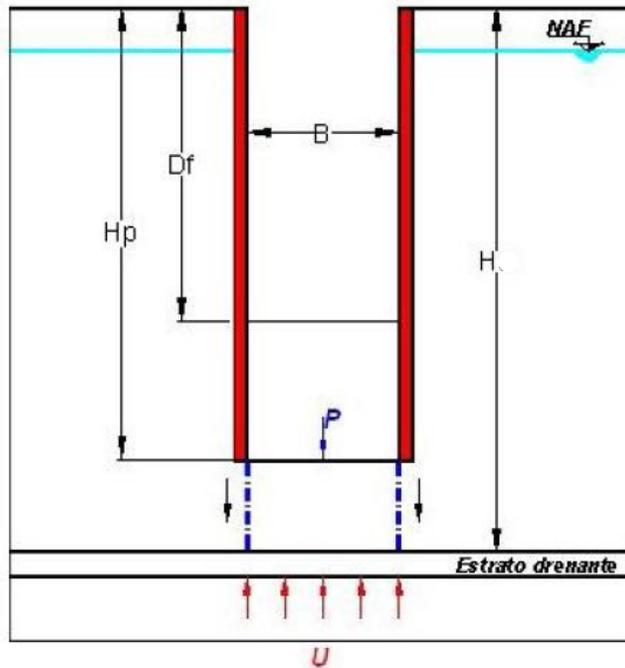


Figura 24. Mecanismo de falla por supresión de lumbrera 20

³⁶ Gobierno del Distrito Federal (GDF), Reglamento de Construcciones del Distrito Federal (RCDF), Normas Técnicas Complementarias para el Diseño de Cimentaciones, México D.F., 2001



Con base en la instrumentación realizada, se determina que se podrá excavar en seco de las profundidades 0 a 65 m, aunque será necesario como medida adicional de seguridad tener disponible equipo para bombeo de achique.

Para mantener un FS mínimo de 1,5 a la máxima profundidad de excavación (152 m), la presión de poro debe ser abatida a una condición máxima permisible de 47 kPa, en el estrato drenante localizado a 156 m de profundidad (ver cálculos y figura 8 en anexo).

6.3.4 Modelado numérico de la L20 ³⁷

Para el modelado de la lumbrera se utilizó el programa PLAXIS V8.2 basado en el Método de Elemento Finito (FEM), empleado para realizar análisis bidimensionales tanto de deformaciones y de estabilidad en ingeniería geotécnica, desarrollado por la Universidad Técnica de Delft en 1987.

Para ejecutar aplicaciones geotécnicas el programa genera una serie de modelos constitutivos para la simulación del comportamiento de suelos y rocas. Dado que el suelo es un material multifacético son necesarios procedimientos avanzados para integrar presiones de poro hidrostáticas y dinámicas actuantes en el suelo.

PLAXIS considera de manera conjunta el comportamiento de los materiales, las condiciones de frontera y las fuerzas externas, para determinar el equilibrio del sistema a través de una compatibilidad de deformaciones de todos los elementos.

A continuación se realiza una breve descripción de las características más importantes del programa:

- **Entrada grafica para generar el modelo geométrico:** la entrada de los diferentes estratos de suelos, estructuras, etapas de construcción, cargas y condiciones de frontera está basado en procedimientos similares a los realizados en el AUTOCAD, una vez realizado el modelo una malla 2D de elementos finitos es generada.

³⁷ PLAXIS V8.2, Introductory Tutorial Manual,2009.



- **Elementos placa:** Una serie de elementos viga son usados para modelar muros de retención, túneles, membranas entre otras estructuras. El comportamiento de estos elementos es definido usando su rigidez normal y a la flexión, así como los momentos actuantes.
- **Interfaces:** Son elementos disponibles para modelar la interacción suelo-estructura.
- **Modelo Mohr-Coulomb:** Este modelo no lineal está basado en parámetros del suelo que son bien conocidos en la ingeniería práctica (ϕ, s_u), el cual puede ser usado para determinar capacidades de carga últimas en cimentaciones y factores de seguridad en taludes.
- **Etapas de construcción:** El programa permite la simulación de diferentes etapas de construcción y excavación de un proyecto geotécnico, por medio de la activación y desactivación de elementos de suelo, elementos estructurales, cargas, cambios en el NAF, etc., arrojando resultados de esfuerzos y deformaciones que se generan durante las etapas definidas.
- **Factores de Seguridad (FS):** Los factores de seguridad son definidos por el cociente entre la resistencia original y la resistencia reducida de las zonas que presenta deformaciones excesivas. PLAXIS determina el factor de seguridad por medio de la herramienta "phi-c reduction".
- **Presentación de resultados:** Valores de desplazamientos, esfuerzos, deformaciones, momentos entre otros son calculados y presentados por PLAXIS de forma gráfica.

En el caso de lumbreras, es adecuado estudiar su proceso constructivo a través de análisis bidimensionales axisimétricos, dada la forma cilíndrica que tendrá la estructura.

Los suelos fueron modelados como materiales con comportamiento elastoplástico, asignándoles un módulo de elasticidad, E , y una relación de Poisson, ν , para la fase elástica, definiendo la fase plástica con la ley de resistencia Mohr-Coulomb, con parámetros de resistencia al esfuerzo cortante no drenado, s_u , y ángulo de fricción, ϕ . Las propiedades utilizadas en el modelo son las indicadas en la tabla 7.



Las condiciones iniciales antes de estudiar la secuencia constructiva, toman en cuenta la distribución piezométrica del sitio y una relación de esfuerzos efectivos horizontal y vertical (k_0) estimada con la expresión de Jacky (1948) y una sobrecarga superficial derivada de los trabajos realizados en la superficie durante el proceso de construcción.

Modelado el corte de la lumbrera, se determina el valor del FS obtenido con el programa, usando la herramienta “phi-c reduction”, en la que realiza una reducción monotónica de las propiedades s_u y ϕ del medio.

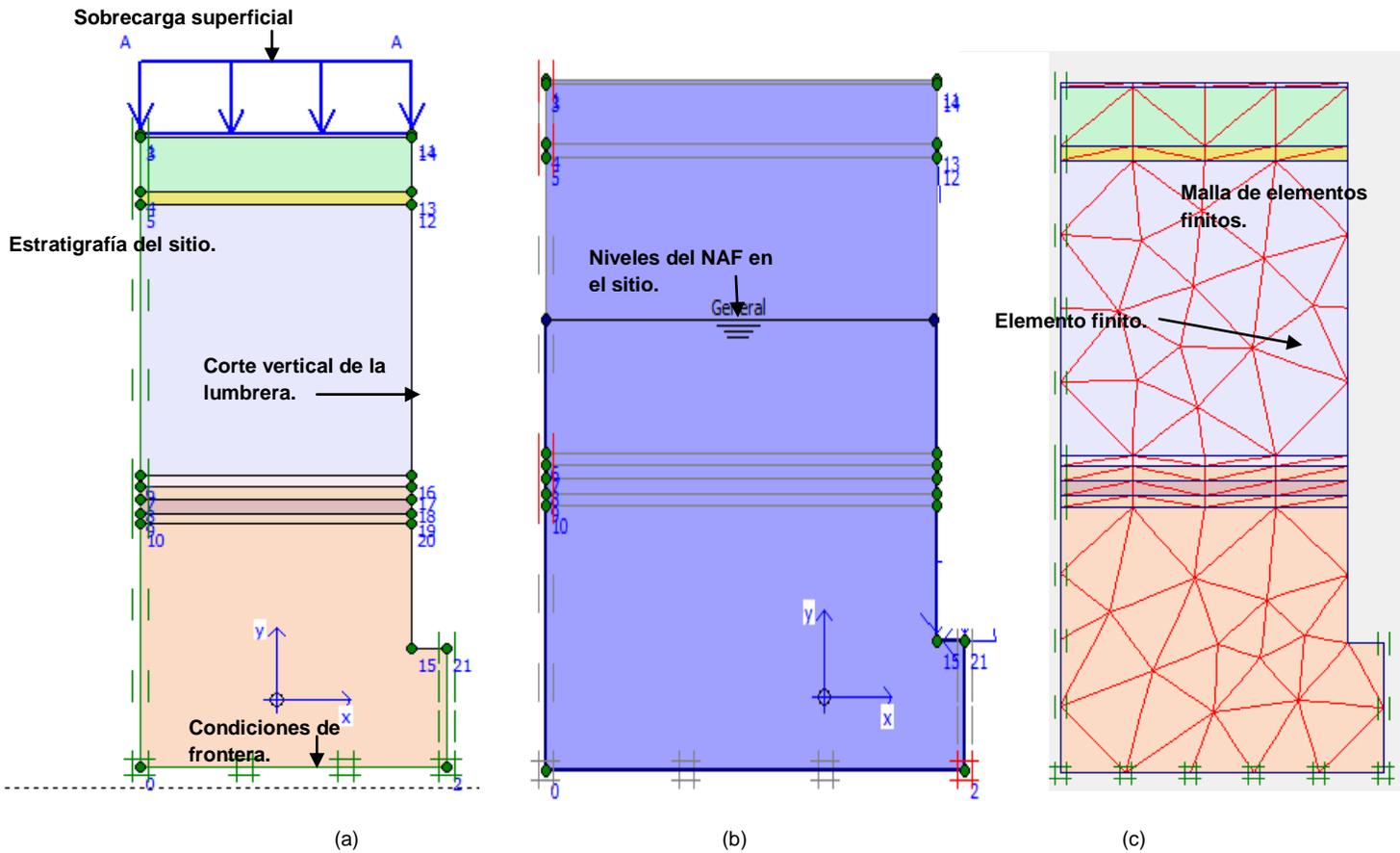


Figura 25. (a) Modelado del corte de la lumbrera, (b) Condiciones piezométricas en el sitio de la lumbrera, (c) Discretización del modelo geotécnico por el MEF.³⁸

³⁸ PLAXIS V8.2



Resultados e interpretación

Condiciones generales de modelación

El modelo de elementos finitos utilizado para los análisis 2D se consideró axisimétrico, con respecto al centro de la lumbrera, el modelo inicial se realizó sin considerar ningún sistema de estabilización para revisar el comportamiento de la lumbrera bajo ésta condición. Los análisis ejecutados fueron estáticos con lo que se obtuvo un FS de 0.80, siendo no satisfactorio en términos de estabilidad, considerando como mínimo un valor de 1.5 para estas condiciones (Referencia³⁹).

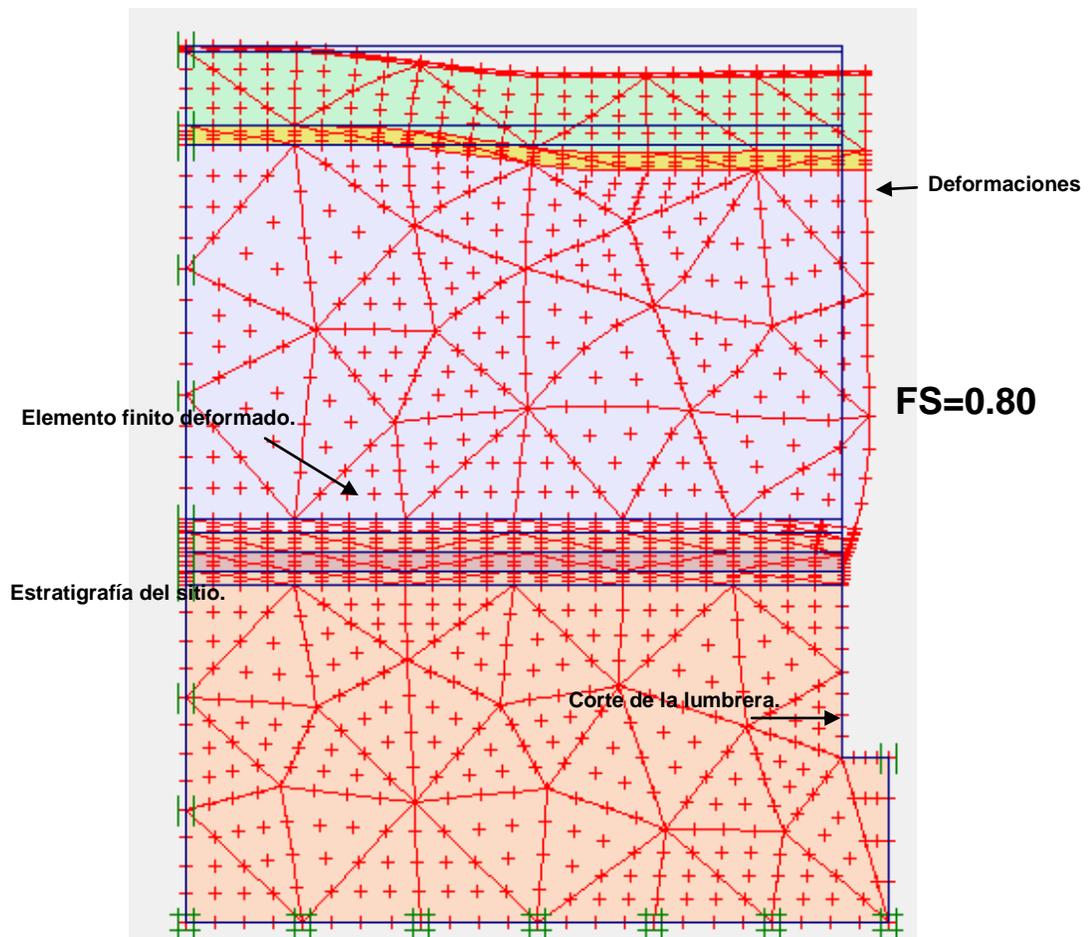


Figura 26. Malla de elementos finitos deformados determinándose un FS=0.80⁴⁰

³⁹ Cuevas ,Arenas, Cuevas, XXV Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica, Sistemas de anclaje, Acapulco Guerrero,2010

⁴⁰ PLAXIS V8.2



Empujes laterales y superficie potencial de falla

Con el modelo ejecutado se determinaron los empujes horizontales totales sobre el corte, siendo el valor máximo del orden de 2870 kPa a una profundidad de 152 m; Al igual, se obtuvo el mecanismo hipotético de falla para el corte de la lumbrera 20, necesario para análisis posteriores.

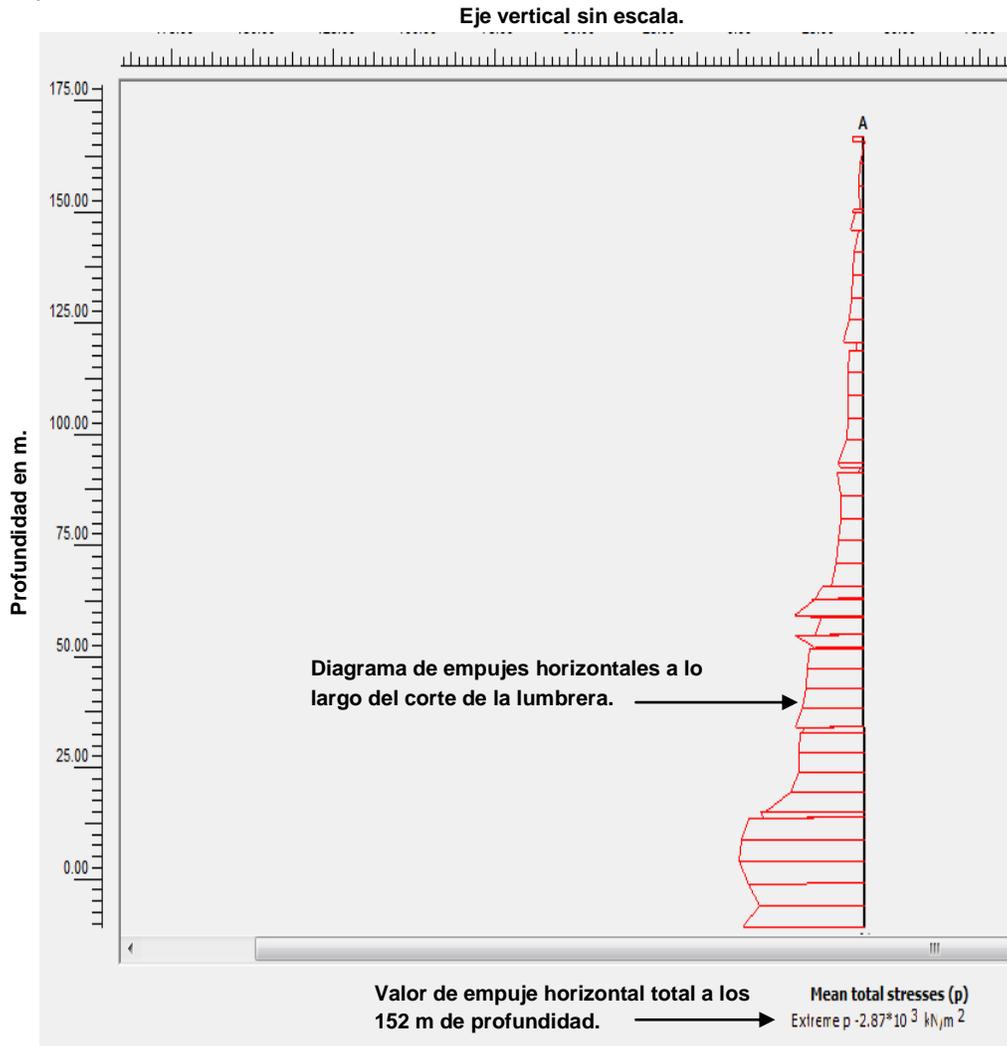


Figura 27. Empujes horizontales totales,⁴¹

⁴¹ PLAXIS V8.2

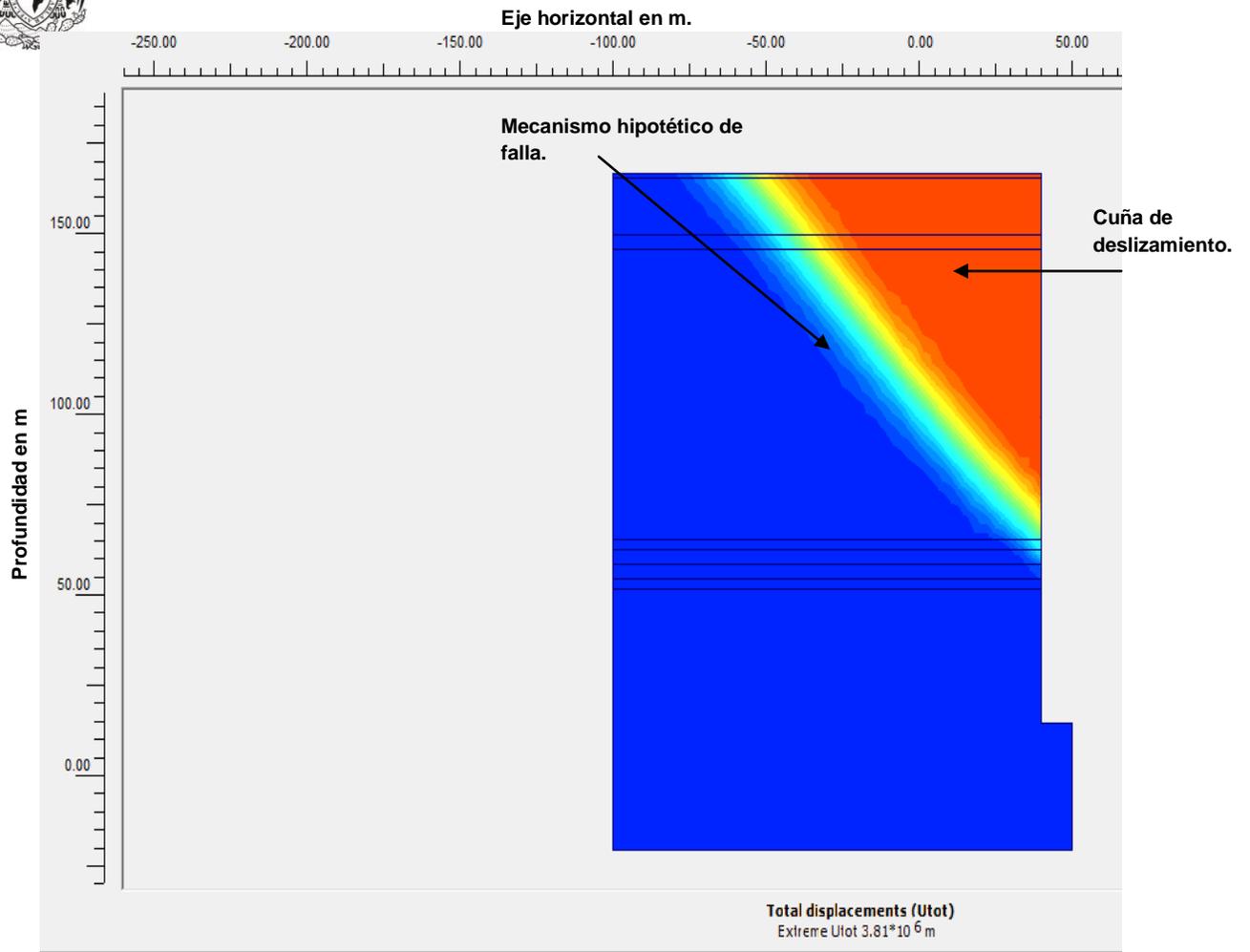


Figura 28. Mecanismo hipotético de falla en el corte de la lumbrera.⁴²

⁴² PLAXIS V8.2



6.3.5 Análisis de la estabilidad de la primera etapa de construcción

Condiciones generales

La primera etapa de construcción comprende de la superficie de la lumbrera hasta los 60 m de profundidad, la excavación será por etapas de 3 m y se colocará inmediatamente un revestimiento de concreto lanzado (CL).

La modelación de la presente etapa siguió los lineamientos generales indicados en el capítulo anterior. Para el caso de los geomateriales, éstos son los mostrados en la tabla 7; Para el caso de los elementos de concreto (concreto lanzado), se modelaron como elemento placa con comportamiento elástico lineal, con un $E = \sqrt{14000} f'c$ y una $\nu = 0.15$ y un espesor estimado de 60 cm.

El procedimiento constructivo y el revestimiento de concreto lanzado se modelaron en el programa PLAXIS, el análisis da como resultado la falla del corte a los 30 m de profundidad, presentándose deformaciones excesivas y un FS global en la etapa de construcción de 0.70.

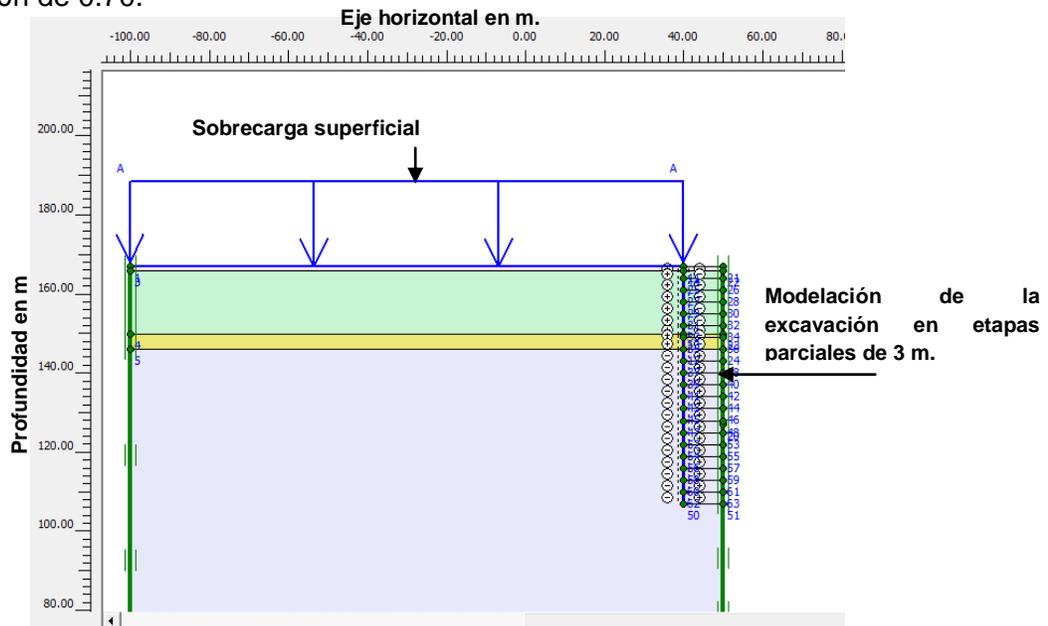


Figura 29. Modelado de la primera etapa de excavación, excavando en etapas parciales de 3 m de profundidad.⁴³

⁴³ PLAXIS V8.2

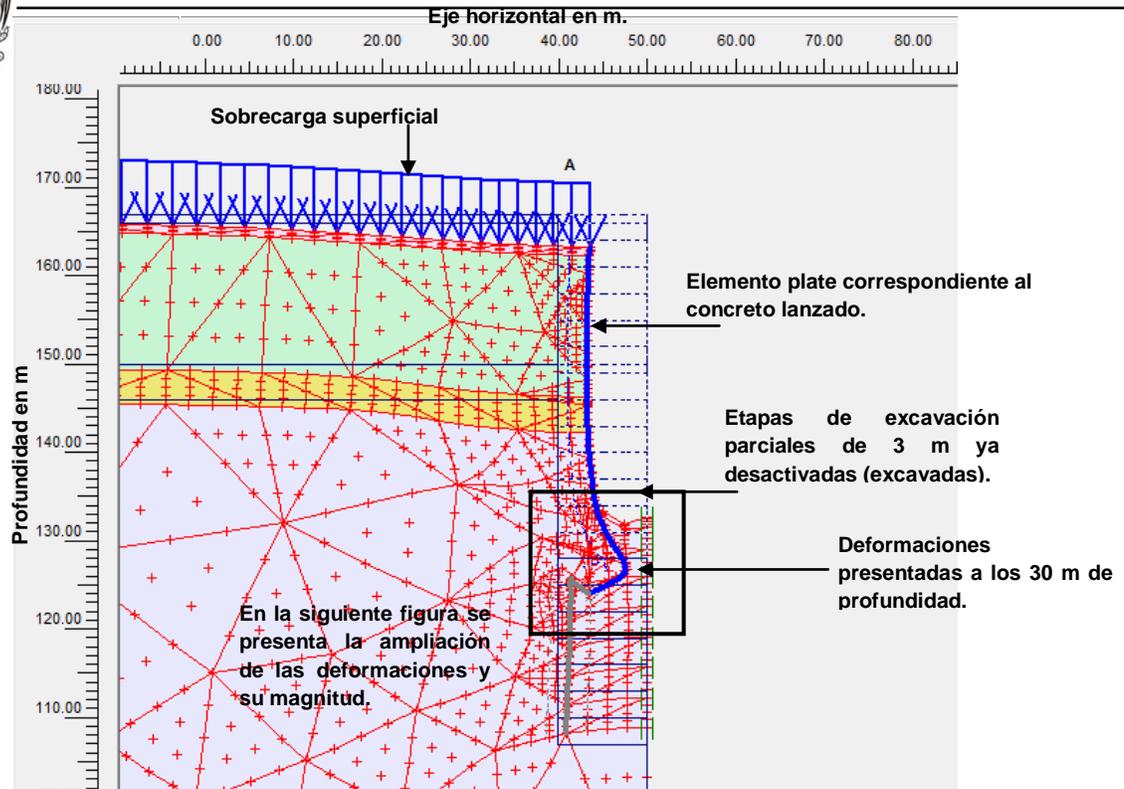
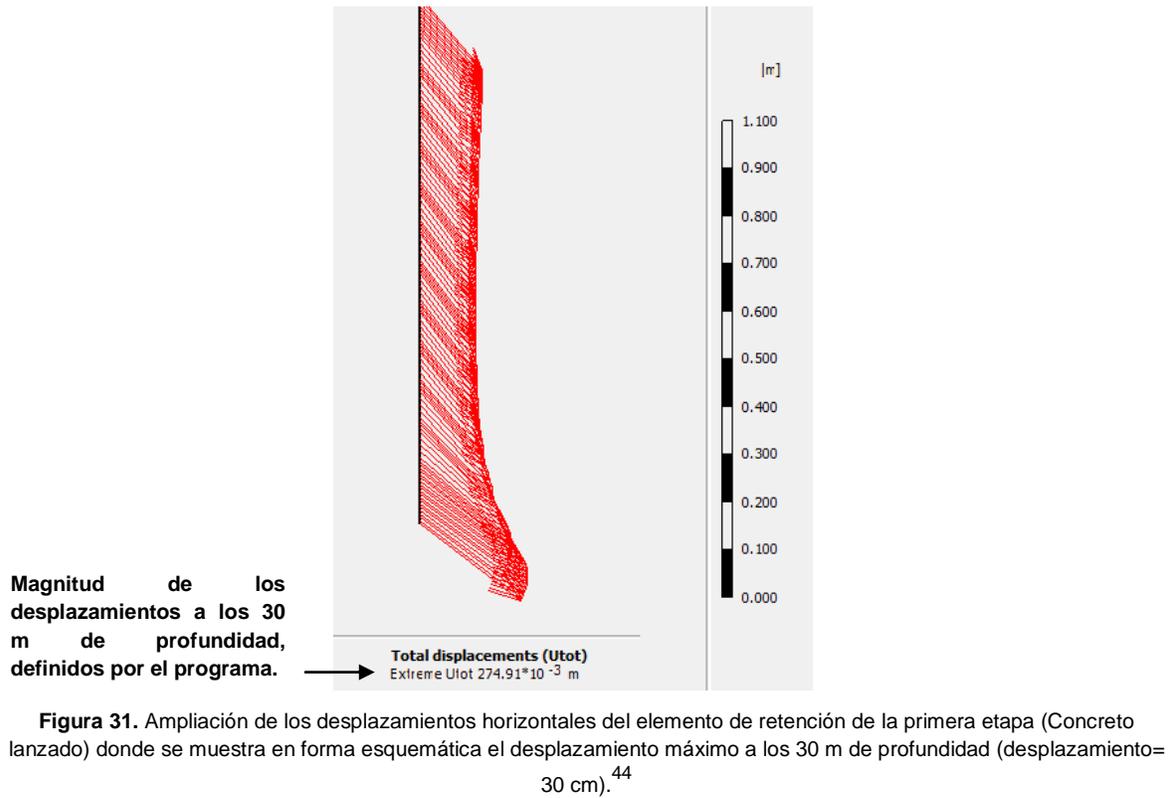


Figura 30. Malla de elementos finitos deformada al finalizar la revisión de la primera etapa de construcción.⁴⁴



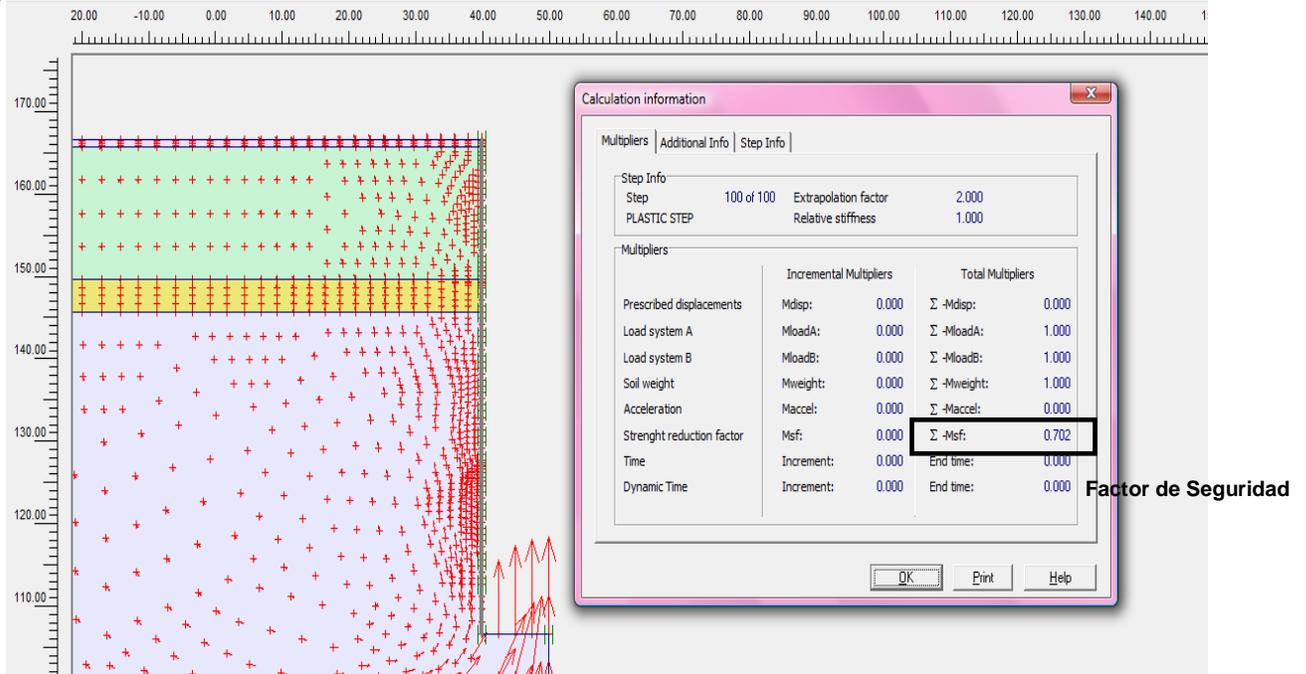


Figura 32. Factor de seguridad en la primera etapa de excavación.⁴⁴

Analizando los resultados anteriores, se determina que los estados límite de falla y de servicio son sobrepasados y que es necesario disminuir de manera significativa las deformaciones presentadas al realizar el corte de la lumbrera.

Por tal motivo, se propone el uso de anillos prefabricados de concreto o acero, ya que una reacción en sentido contrario a los empujes del suelo aumentarán los momentos resistentes en el análisis de equilibrio límite del corte (ver figura 33).

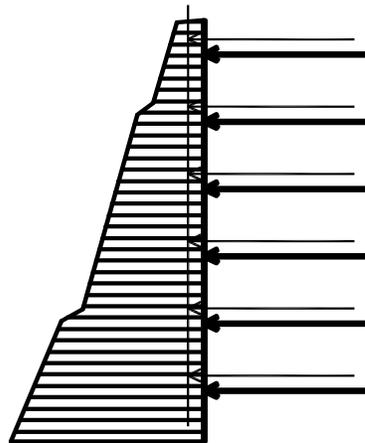


Figura 33. Reacciones generadas por los anillos prefabricados.



El método propuesto de Anillos Prefabricado (AP) tiene su origen en el método de construcción de túneles con revestimiento primario constituido por dovelas, considerando los AP como dovelas precoladas, el espesor del anillo se determina con la expresión correspondiente al diseño plástico de un marco sujeto a una presión uniforme p_u :

$$Esp := \frac{F_c \cdot p_u \cdot D}{2 \cdot f_c} \quad 45$$

Donde:

- D Diámetro de la lumbrera en en m.
- f_c Esfuerzo de fluencia plástico del concreto($f_c=0.8f'_c$), en kPa.
- F_c Factor de carga (generalmente igual a 2, para revestimientos primarios, y 3 para revestimiento único).
- p_u Presión radial uniforme en kPa.

Adicionalmente, en las revisiones geotécnicas de falla de fondo se determinaron profundidades potenciales de falla a los 50 y 60 m de profundidad (Ver gráfica 1); Por lo tanto, para contener el flujo plástico hacia el interior de la lumbrera, **se propone iniciar la construcción del muro Milán de la segunda etapa a los 40 m de profundidad.**

6.3.6 Análisis de la estabilidad del sistema de anillos prefabricados (AP)

Condiciones generales de modelación

Para simular los AP dentro de la modelación matemática se utilizó un símil con un elemento rígido de fijación (rotation fixity beams).

⁴⁵ Gutiérrez Morgado Pablo, Análisis y Diseño del Revestimiento de un Túnel en Suelos del Valle de México, Tesis Profesional para obtener el grado de Ingeniero Civil , UAM Azcapotzalco, México DF, 2009



Secuencia constructiva

- a) Activación de la carga superficial.
- b) Inicio de la excavación vertical del núcleo central sin soporte (de 0 a 40 m de profundidad) sustituyendo el material excavado en todo momento por lodos bentoníticos.
- c) Activación de los anillos prefabricados (rotation fixity beams).
- d) Activación del elemento *plate*, el cual, simula el concreto colado entre los anillos y la pared de la lumbrera, utilizando los primeros como cimbra (considerando un espesor final de 60 cm).
- e) Determinación del FS de la primera etapa de construcción.

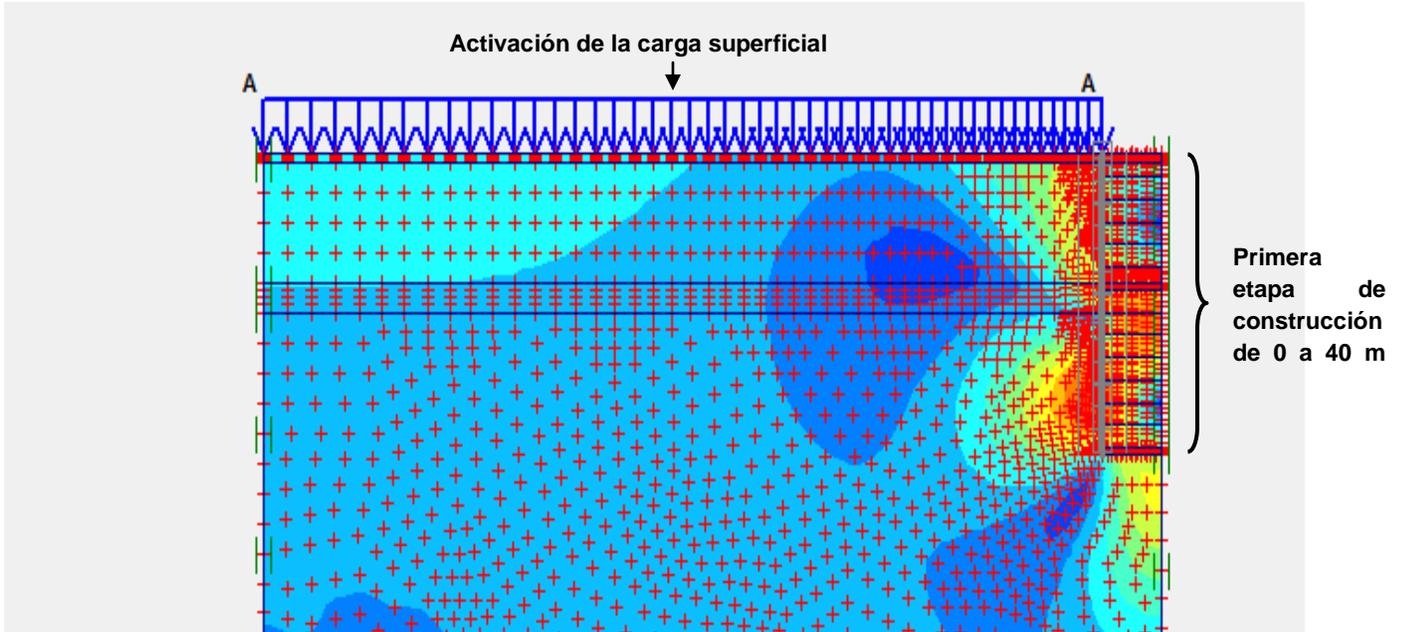
Resultados e interpretación

Dentro de los análisis ejecutados se tomaron en cuenta las etapas de excavación y construcción del primer tramo de la lumbrera, considerando una sobrecarga en la superficie producto de los equipos de construcción de 30 kPa.

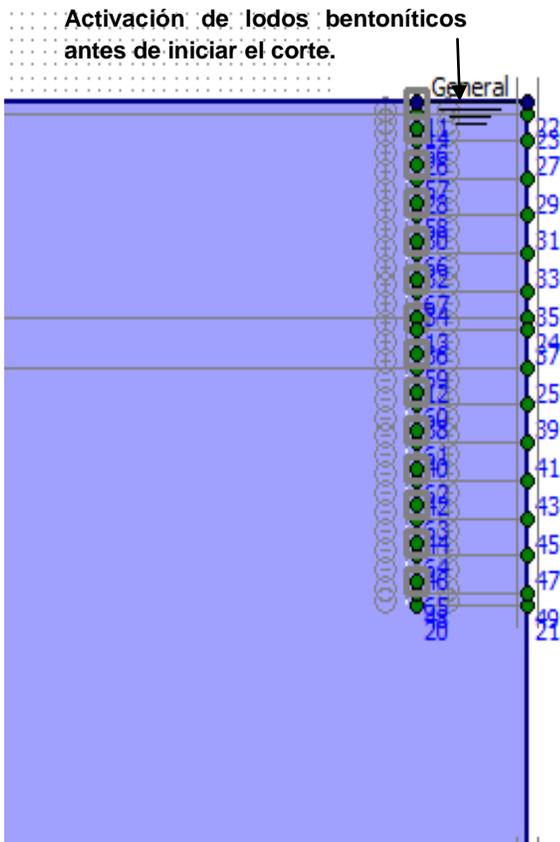
Se tomó en cuenta, que antes de iniciar la excavación del núcleo de la lumbrera, los niveles piezométricos, se encontraban en su estado original (65 m de profundidad) nivel inferior al de la profundidad de la primera etapa de excavación, ésta se modeló en una sola etapa, sustituyendo el material por lodos bentoníticos.

Una vez terminada la excavación del núcleo se activaron los AP y el colado de concreto entre los anillos y la pared de la lumbrera y se determinó el FS global de la primera etapa de construcción.

En las siguientes figuras (figura 34) se muestra la modelación del sistema de construcción descrito:

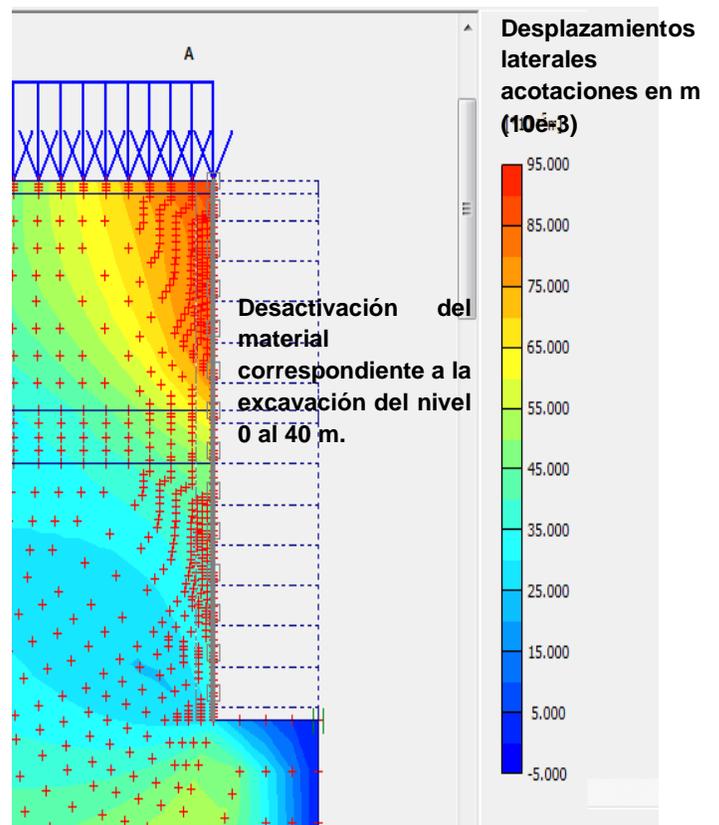


(a) Activación de la carga superficial



(b)

Activación de la presión de lodos bentoníticos actuando sobre el corte



(c)

Determinación de los desplazamientos horizontales al momento de terminar la excavación y antes de la activación de los AP

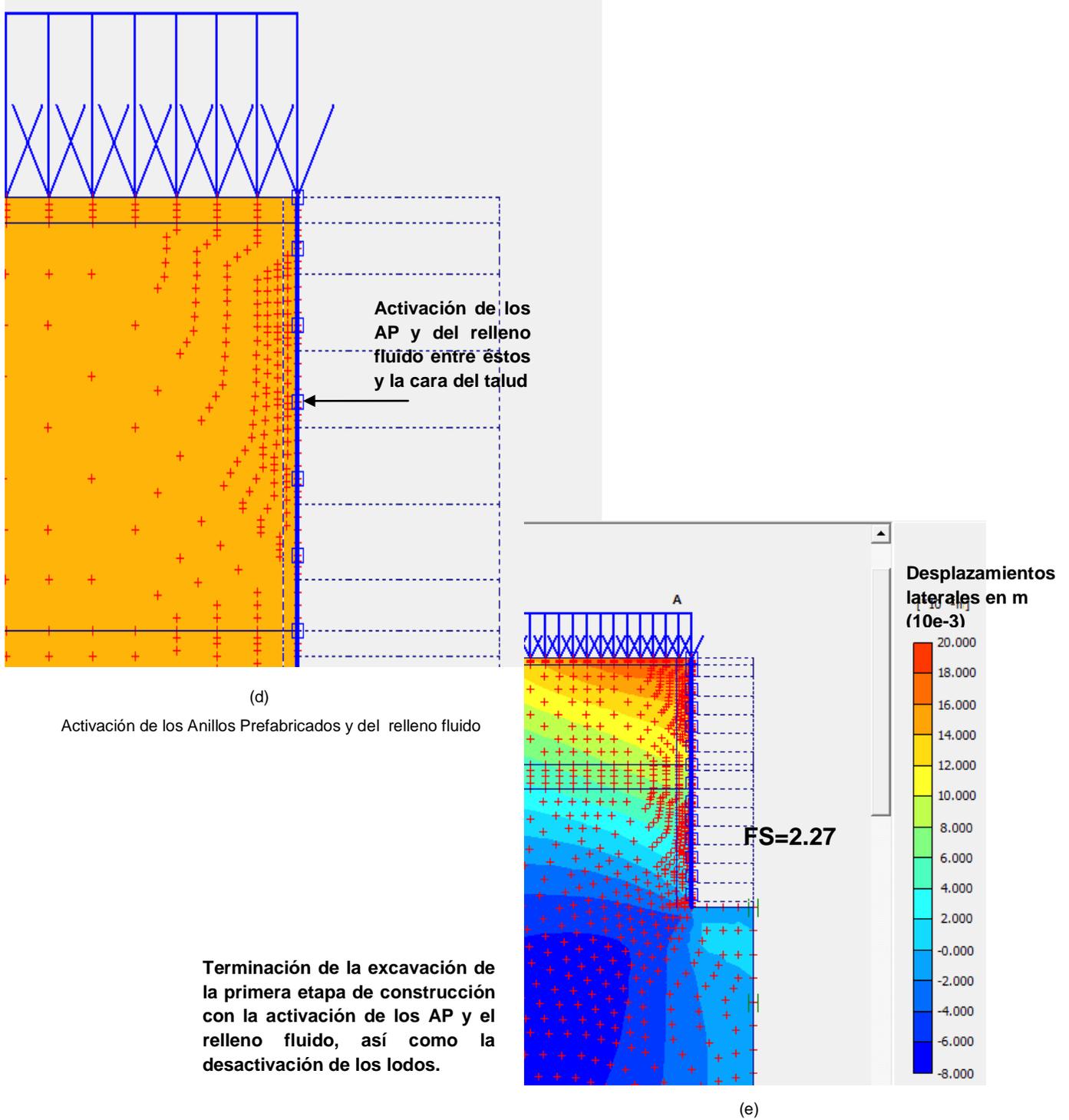


Figura 34. Secuencia constructiva, primera etapa de construcción de la lumbrera 20⁴⁶

⁴⁶ PLAXIS V8.2



Los valores de FS fueron obtenidos con el programa, usando la herramienta “phi-reduction” obteniendo como Factor de Seguridad un valor de 2.27, considerando este valor como satisfactorio para la primera etapa de construcción (0 a 40 m).

Deformaciones

Dentro del modelo numérico generado, se determinaron los desplazamientos, teniendo como valores máximos: 2.4 cm en el sentido horizontal (hacia el interior de la excavación) y 1 cm en el sentido vertical (expansión al final de la excavación del núcleo) y 3.5 cm en la superficie de la lumbrera.

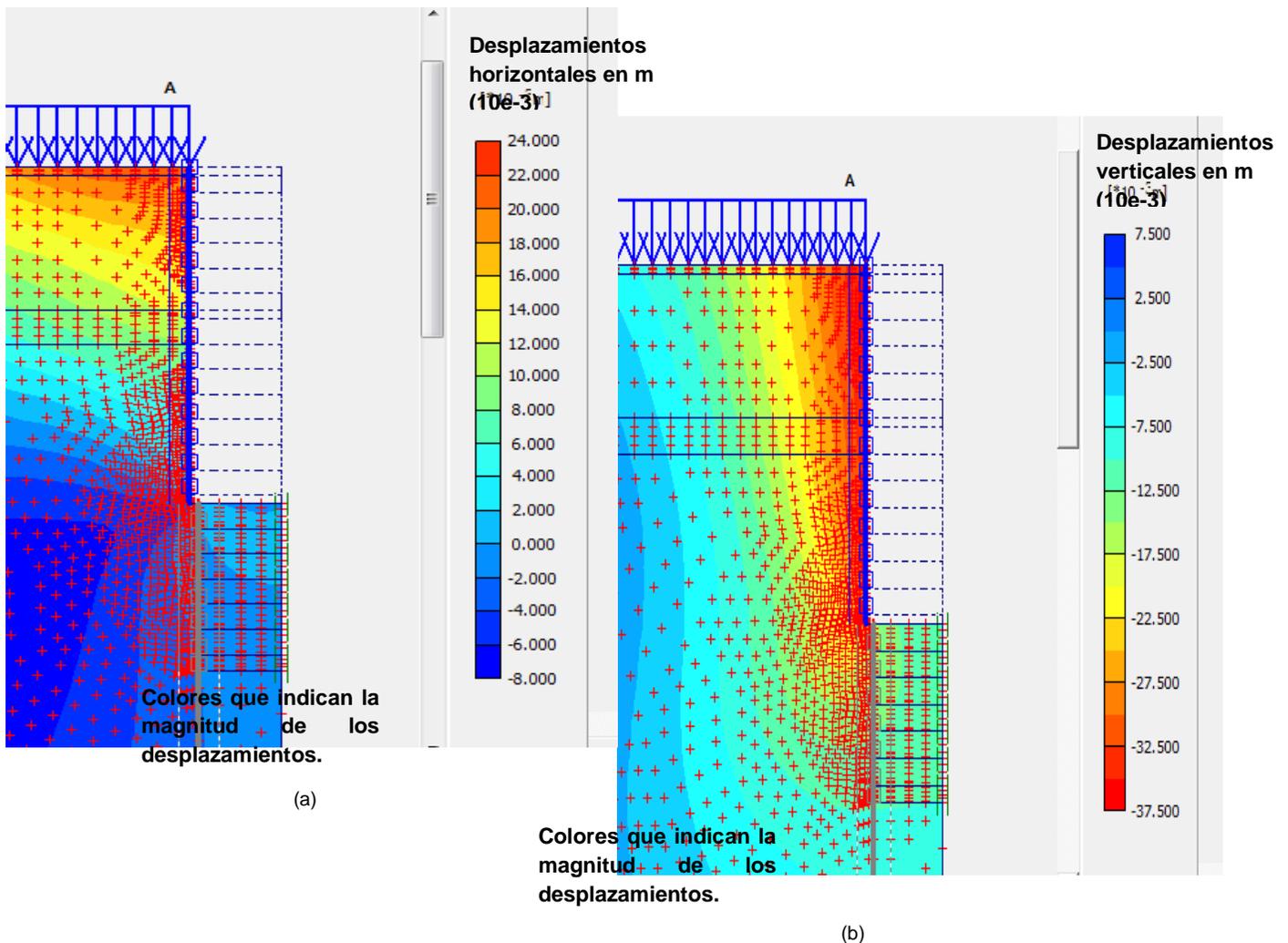


Figura 35. (a) Deformaciones horizontales, (b) Deformaciones verticales.⁴⁷

⁴⁷ PLAXIS V8.2



En resumen, se observa que los resultados son satisfactorios, ya que los desplazamientos calculados son mínimos y el factor de seguridad es superior a 1.50, en la tabla siguiente se muestran los FS calculados para la estabilidad de esta etapa de construcción.

Tabla 8. Factores de Seguridad al finalizar la primera etapa de construcción de la lumbrera 20

Primera etapa de construcción de 0 a 40 m		
	Estabilidad de lumbrera	Falla de fondo
FS	2.27	1.78

6.3.7 Análisis de la estabilidad de la segunda etapa de construcción

Condiciones generales

Con lo expuesto en el inciso anterior, la primera etapa de excavación corresponde desde la superficie de la lumbrera hasta los 40 m de profundidad.

De la revisión de la falla de fondo se visualiza que a los 150 m de profundidad, la construcción de la lumbrera es susceptible a sufrir un flujo plástico al interior de ésta (ver gráfica 1), por lo tanto, se propone incrementar la profundidad del ER-1 más allá de la profundidad de la losa de fondo de la lumbrera, con el fin de aumentar la longitud de la superficie potencial de falla y contener los posibles empujes del flujo plástico a la profundidad mencionada (Se propone extender el ERI-1, 10 m por debajo de la losa de fondo de la lumbrera).

El método de construcción del ERI-1, podrá consistir en el uso de pilas o pilotes secantes o incluso muro Milán, la excavación del núcleo central de suelo en el tramo del ERI-1 se podrá realizar hasta que se finalice la construcción del mismo en toda su periferia.

El empotramiento del ERI-1 en la parte inferior de la lumbrera incrementará la estabilidad del muro, esto debido al empuje pasivo generado en la base, que contrarresta los empujes desarrollados a lo largo del elemento, otro factor que se analizará será la colocación de anillos rigidizadores de los 40 a 60 m de profundidad, con el fin de disminuir



los momentos actuantes sobre el ERI-1, calculando éstos de manera similar a una trabe de doble empotramiento.

Previo al análisis de la estabilidad de la segunda etapa de excavación, se procederá a estudiar el comportamiento de equilibrio límite de la zanja anular, donde se alojará el muro Milán y de la excavación del núcleo central de la lumbrera. Estos resultados, se tomarán en cuenta para el modelo del sistema constructivo de la segunda etapa.

6.3.7.1 Análisis de la estabilidad de la zanja anular y del núcleo central para la construcción de paneles para el muro Milán

Para los análisis de equilibrio límite de la estabilidad de la zanja anular se utilizó la expresión siguiente:

$$FS = \frac{s_u L + (E_{LB} \cos \alpha)}{(\sin \alpha (W + q B))}^{48}$$

Donde:

- s_u Resistencia al esfuerzo cortante no drenada ponderada en toda la profundidad de la zanja, en kPa.
- L y B Longitud y el ancho respectivamente de la masa prismática definida por la figura 51 que representa la superficie potencial de falla, truncada por un plano de deslizamiento a 45° , en m.
- E_{LB} Empuje generado por los lodos bentoníticos utilizados en la etapa de construcción en kPa.
- W y α Peso y ángulo de falla de la cuña, en kPa.
- q Sobrepresión en la parte superficial de la lumbrera, en kPa.

⁴⁸ Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, Manual de construcción geotécnica tomo I, México 2002.



Condiciones Generales

Para la revisión, se consideraron los siguientes factores:

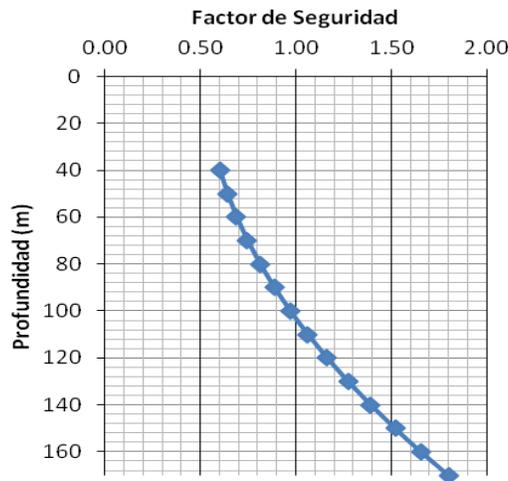
En la superficie de la lumbrera actúa una sobrecarga de 30 kPa, producto de los equipos y movimientos de maquinaria, además la presión de lodos actúa desde el inicio de la segunda etapa de construcción (40 m).

Al momento de construir los paneles alternados para el colado del ERI-1, el núcleo central sólo está confinado por el lodo. Aunque la estabilidad de éste no determina la estabilidad global de la lumbrera, fallas o derrumbes del núcleo retardan su proceso de excavación, debido a que se requiere limpieza del azolve y redefinición del trazo de la zanja anular.

Se considerará que la excavación de la zanja anular y del núcleo se realizarán en una sola etapa; Es decir, cada zanja para un panel del ER-1 se excavará desde los 40 m hasta los 162 m de profundidad y al terminar de colar toda la circunferencia del ERI-1, se procederá por excavar el núcleo central desde los 40 m hasta los 152 m de profundidad.

Resultados e Interpretación

Los resultados obtenidos de la revisión de la estabilidad de la zanja anular se muestran en la tabla 6 del anexo y en la siguiente gráfica.



Gráfica 2. FS de la estabilidad de la zanja anular para la construcción del muro Milán



La gráfica muestra los resultados del análisis bajo las condiciones mencionadas. Se observan FS menores a la unidad entre los 40 y los 100 m de profundidad.

Se debe tener en cuenta que los anillos prefabricados instalados en la primera etapa de construcción generan momentos resistentes que ayudan a la estabilización de la masa prismática que genera deformaciones a lo largo de la excavación de la zanja del muro Milán.

Con estos factores el sistema constructivo fue modelado numéricamente, obteniendo los siguientes resultados.

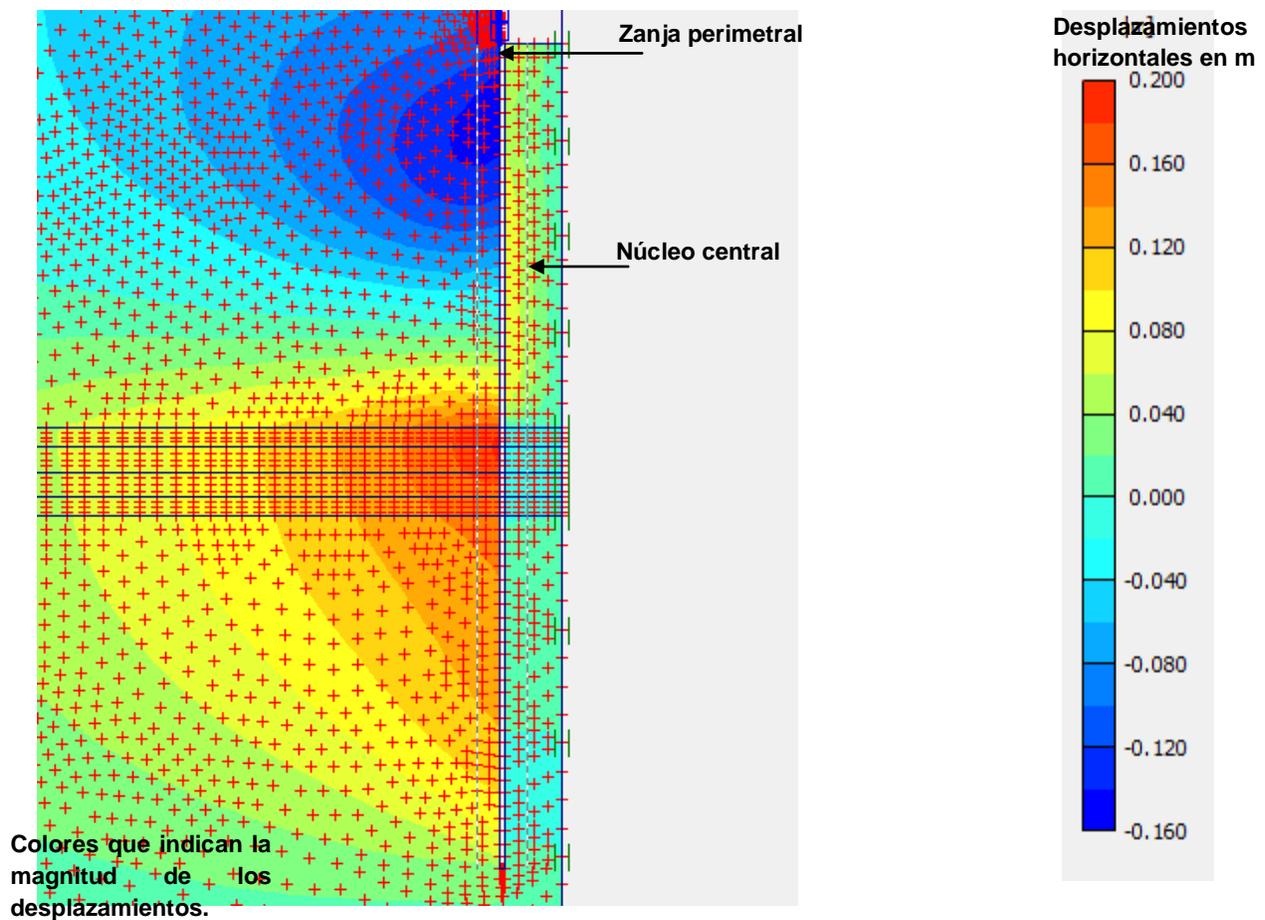
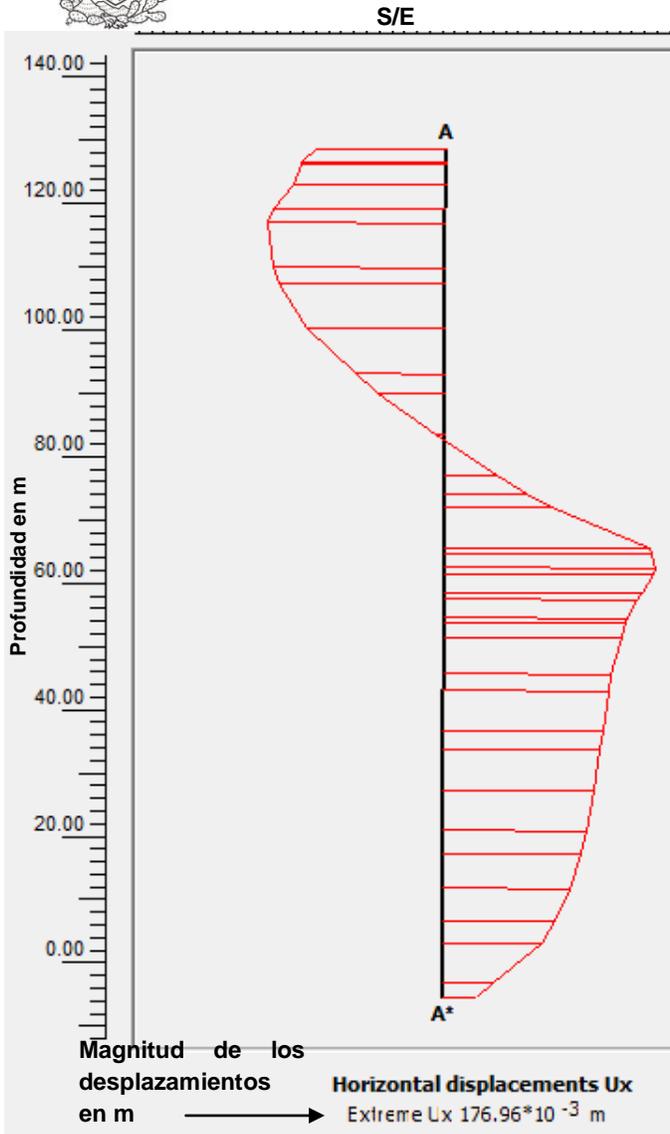
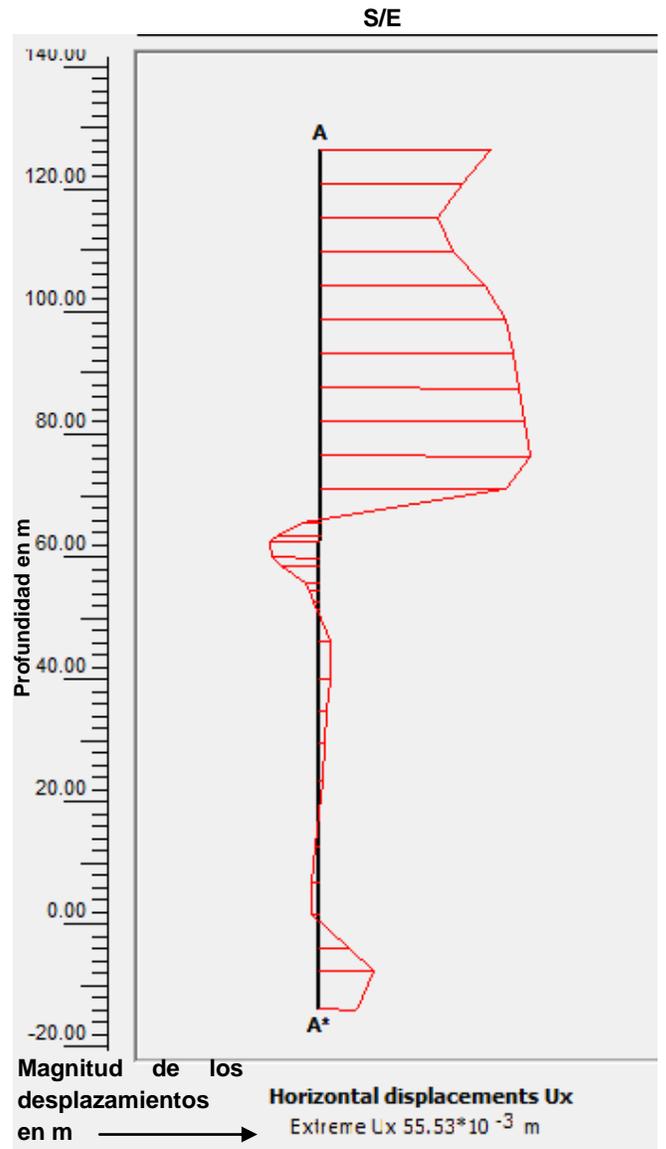


Figura 36. Modelado numérico de la zanja anular y el núcleo central para construcción de paneles de muro Milán y las deformaciones horizontales calculadas en el modelo.⁴⁹

⁴⁹ PLAXIS V8.2



(a)



(b)

Figura 37. (a) Desplazamientos a lo largo de la zanja anular, (b) Desplazamientos del núcleo central.⁵⁰

⁵⁰ PLAXIS V8.2



Deformaciones

Las figuras anteriores muestran contracciones y expansiones a lo largo de la zanja anular con deformaciones de alrededor de 15 cm en ambos casos.

En lo referente al núcleo central, se presentan deformaciones máximas de 5 cm, las deformaciones tanto de la zanja perimetral y del núcleo central son posibles de absorber con un incremento al espesor del ERI-1.

6.3.7.2 Modelación de la segunda etapa de construcción

Condiciones generales de modelación

La modelación de la presente etapa siguió los lineamientos generales indicados en el capítulo 6.3.4 para el caso de los geomateriales, éstos son los mostrados en la tabla 7, para el caso de los elementos de concreto (muro Milán), éstos se modelaron como elemento placa (plate) con comportamiento elástico lineal con un $E = \sqrt{14000 f'c}$ y una $\nu = 0.15$ y un espesor aproximado de 120 cm, para simular los AP se utilizó un símil con un elemento rígido de fijación (rotation fixity beams).

Secuencia constructiva

- a) Después de la estabilización de la primera etapa de excavación se procede a abatir el NAF, bajo las condiciones planteadas en el capítulo 6.3.3.
- b) Se inician los trabajos de la excavación anular de los tableros del muro Milán, sustituyendo el material excavado en todo momento por lodos bentoníticos, con el fin de disminuir las deformaciones en la zanja anular y el núcleo central de la lumbrera.
- c) Se construyen los tableros de muro Milán, el colado se debe realizar mediante la técnica del tubo tremie.



- d) Terminada la estructura anular del muro Milán, se procede con la excavación del núcleo central en una primera etapa de las profundidades 40 a 60 m.
- e) Se instalan los AP en la etapa mencionada.
- f) Se reanuda con la excavación del núcleo central, de los 40 m de profundidad al nivel máximo de excavación.
- g) Se construye la losa fondo.
- h) Se determina el FS de seguridad de la segunda etapa de excavación.

Resultados e interpretación

En los análisis se consideró una sobrecarga en la superficie producto del equipo de construcción de 30 kPa.

Después de realizar el sistema de estabilización de la primera etapa, se procede al abatimiento del NAF garantizando que éste se encuentre cuando menos a 10 m por debajo del nivel máximo de excavación en todo momento. El bombeo tiene por objetivo crear un cono endurecido del material en toda la periferia de la lumbrera, reduciendo así la presión de poro en el sitio y también reducir las filtraciones al interior de la excavación, aún con la suposición de la impermeabilidad del muro Milán.

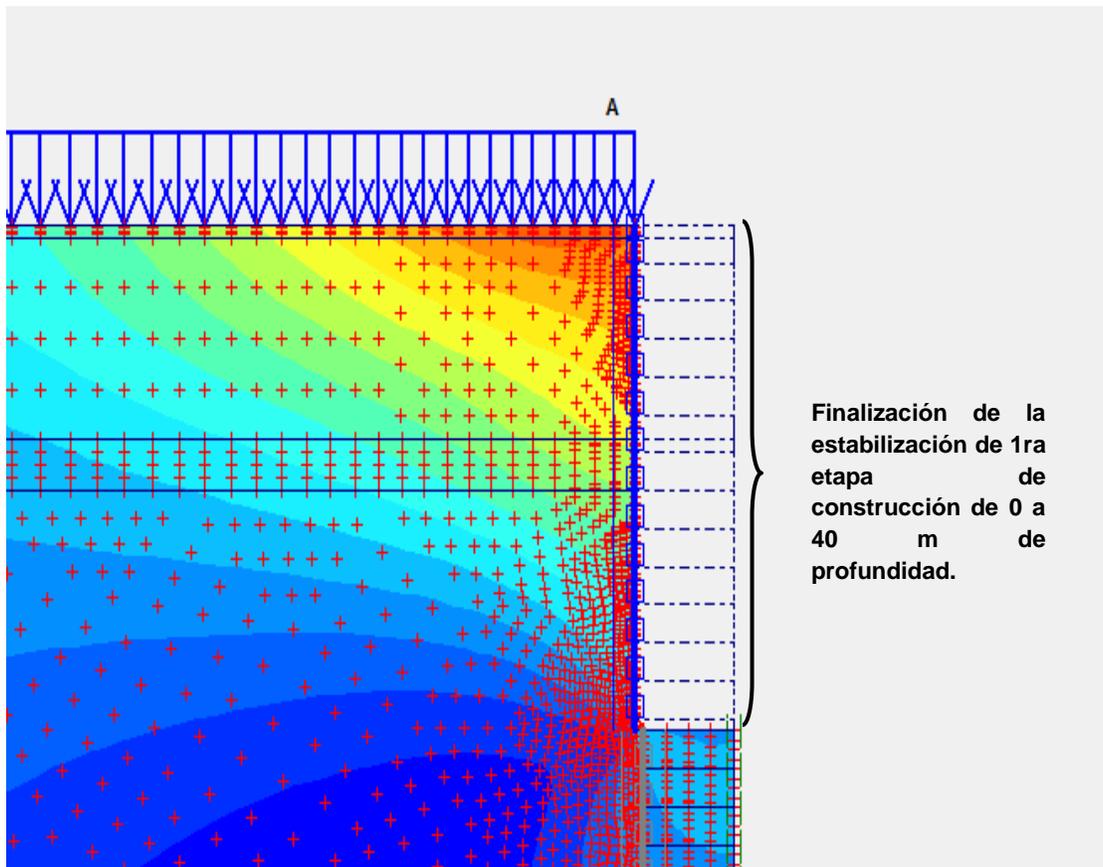
Se inicia la excavación de los tableros para el muro Milán, que se realiza de manera alternada por medio de almeja hidráulica o mecánica bivalva, guiada con kelly telescópico. Se deberá sustituir el material excavado en todo momento por lodo bentonítico, el colado del muro se debe realizar mediante la técnica del tubo tremie.

Al terminar el colado del muro y cuando éste alcance un 80% de su resistencia a la compresión se deberá de continuar con la excavación del núcleo central, considerando un primer corte por etapas entre las profundidades 40 a 60 m con el fin de colocar los AP.

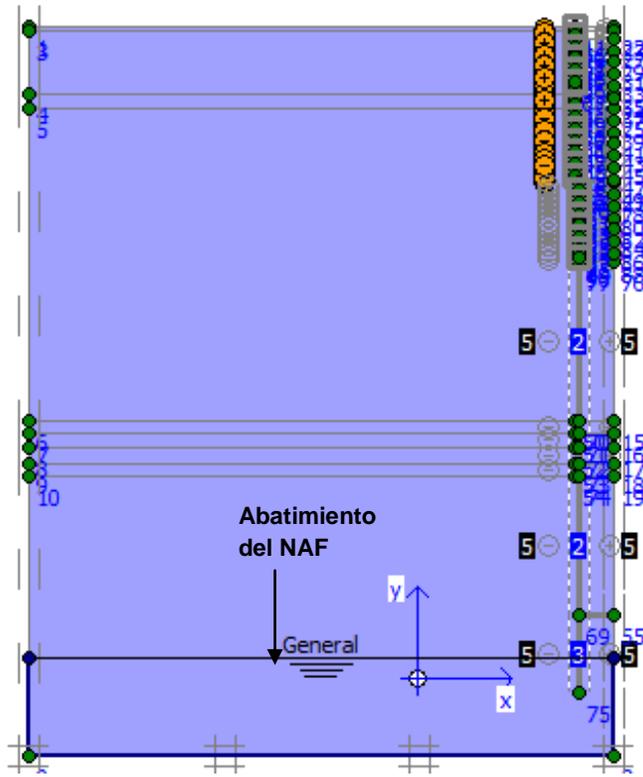


Ya instalado el sistema de reforzamiento del ERI-1, se procede a la excavación del núcleo central, hasta la profundidad máxima de excavación de la Lumbreira 20, para terminar con la construcción de la losa de fondo.

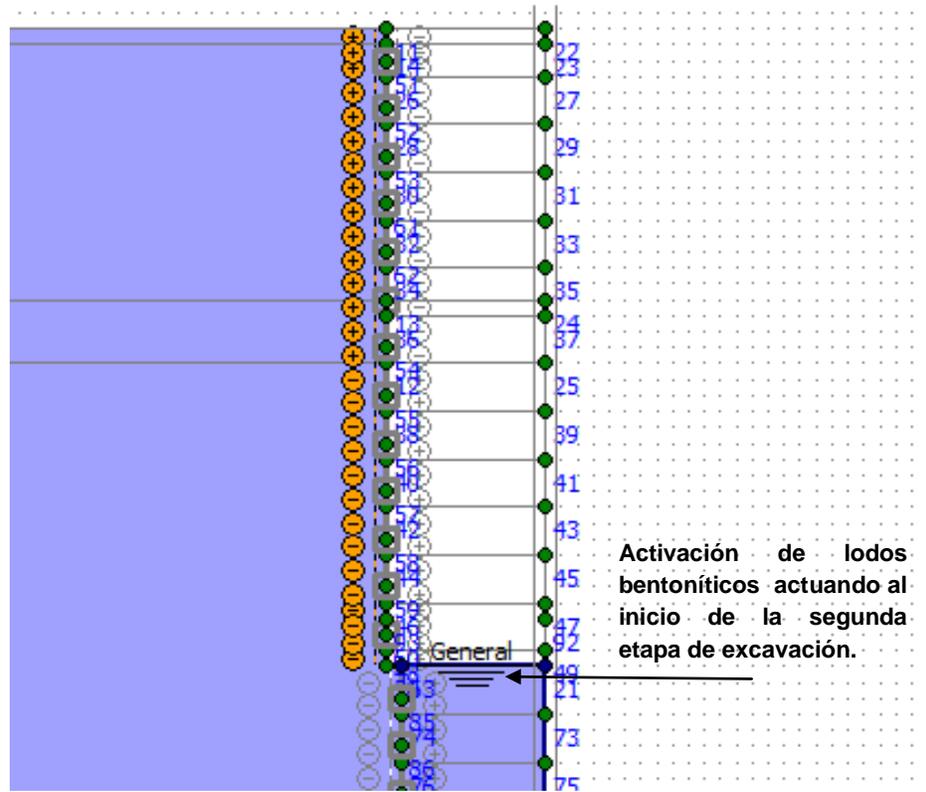
En las siguientes figuras (figura 38) se muestra el procedimiento de construcción indicado:



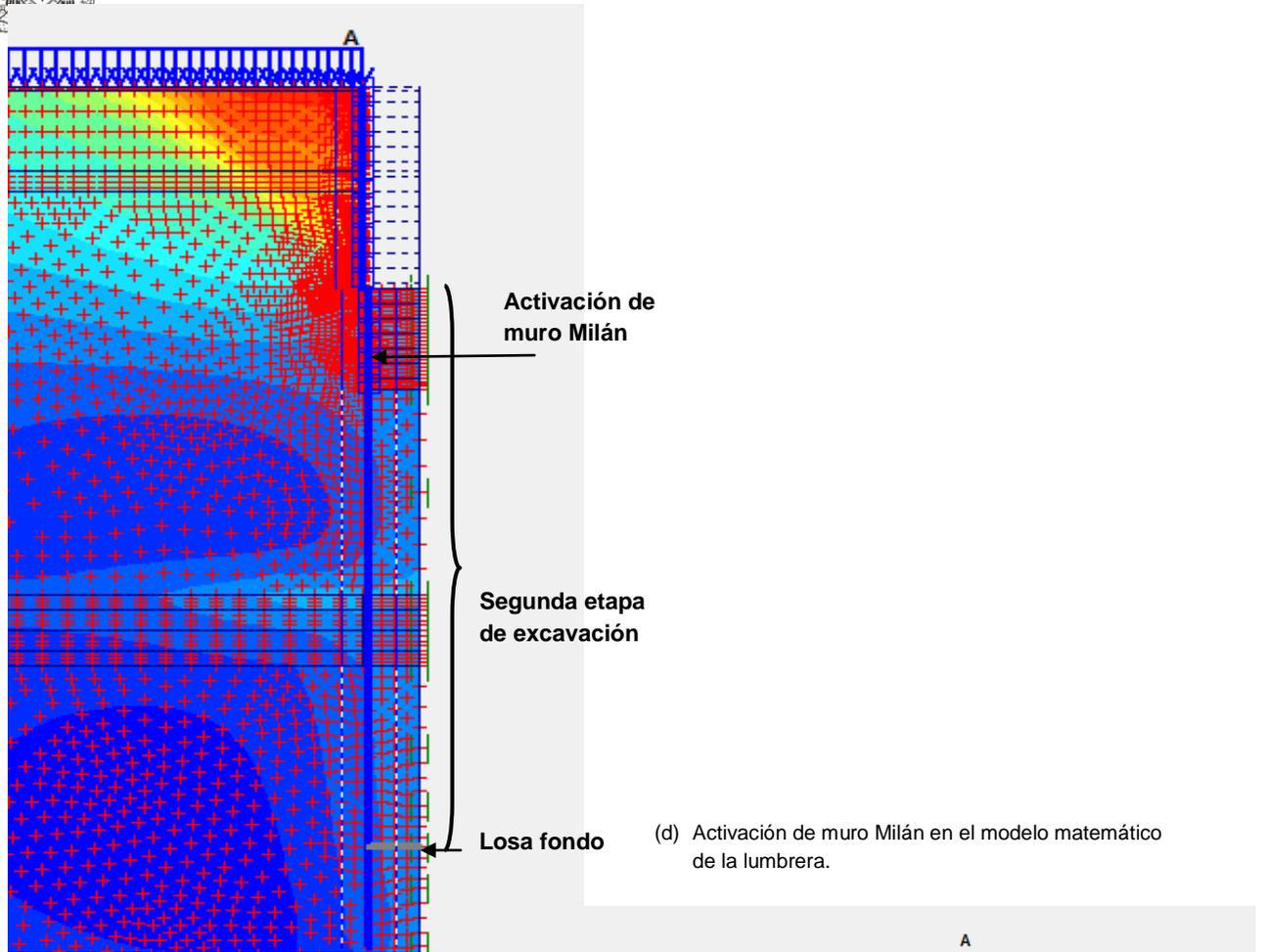
(a) Estabilización de la primera etapa de construcción



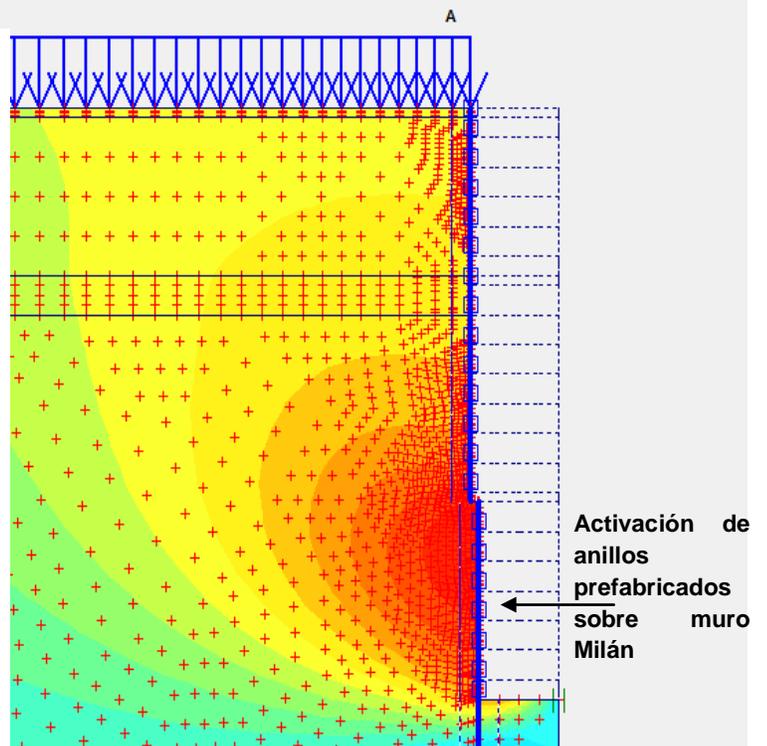
(b) Abatimiento del NAF

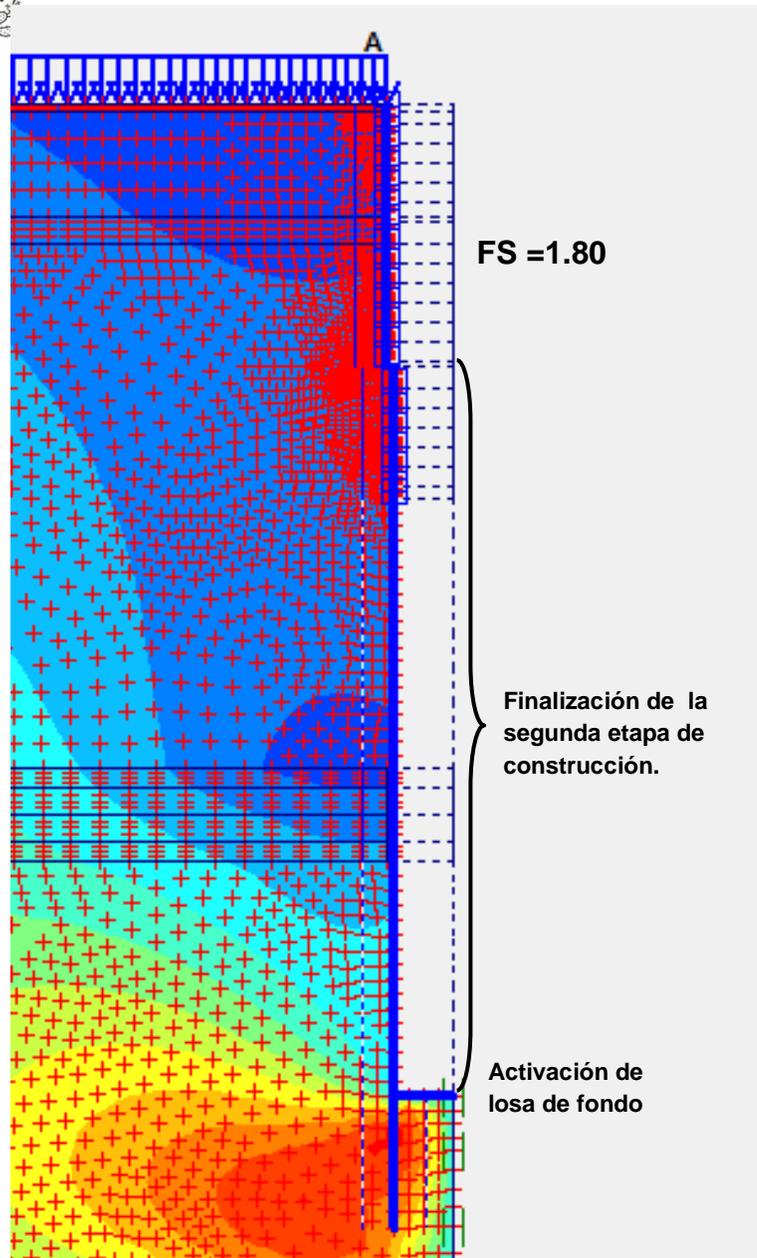


(c) Activación de lodos bentoníticos actuando desde el inicio de la segunda etapa de excavación



Activación de anillos prefabricados entre los 40 y (e) 60 m de profundidad.





(f) Activación de la losa fondo y determinación del FS de la segunda etapa de excavación

Figura 38. Secuencia constructiva, segunda etapa de construcción de lumbrera 20⁵¹

Los valores de FS fueron obtenidos con el programa, usando la herramienta “phi-c reduction”, obteniendo como factor un valor de 1.80, considerando éste como satisfactorio para la segunda etapa de construcción.

⁵¹ PLAXIS V8.2

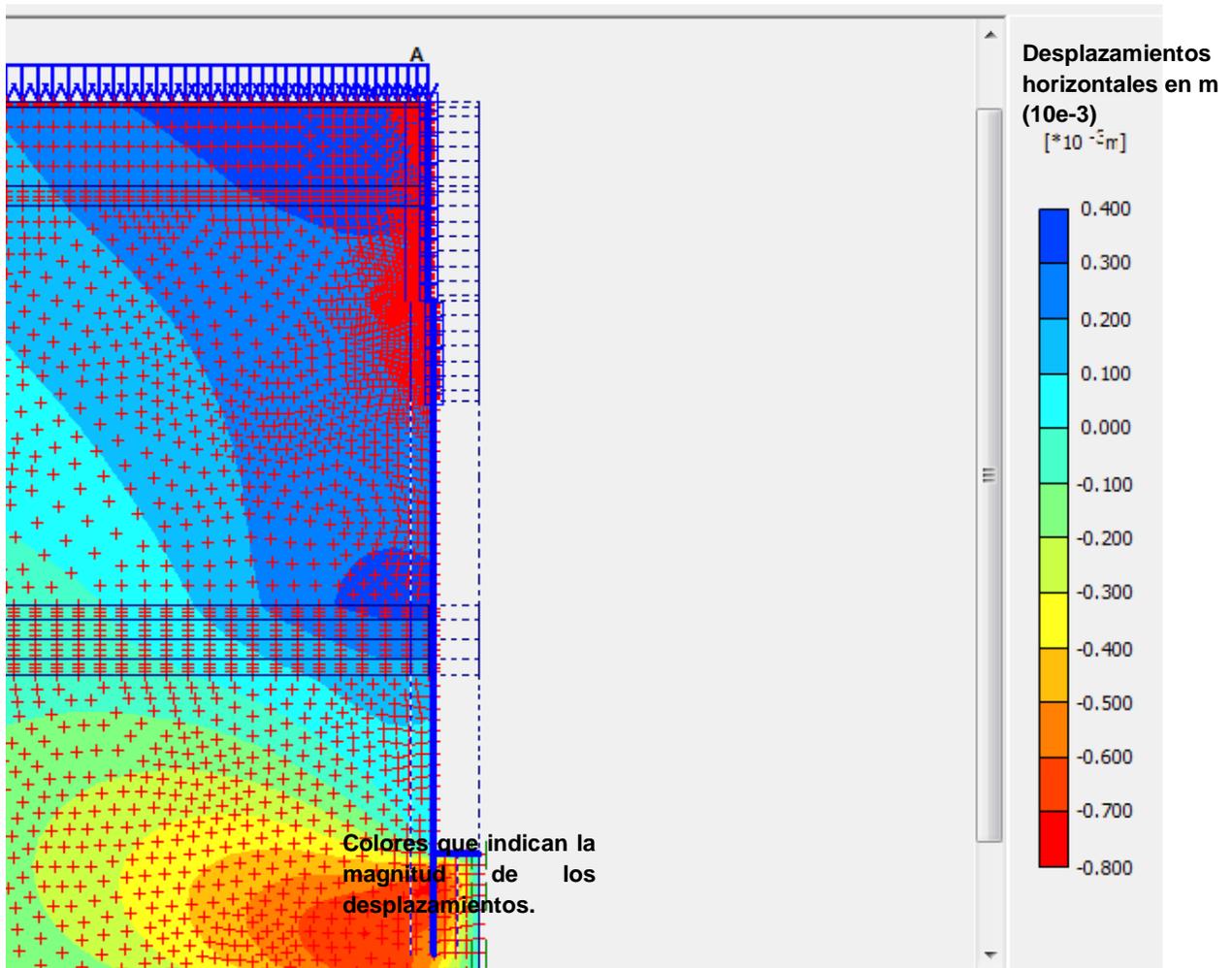


Deformaciones

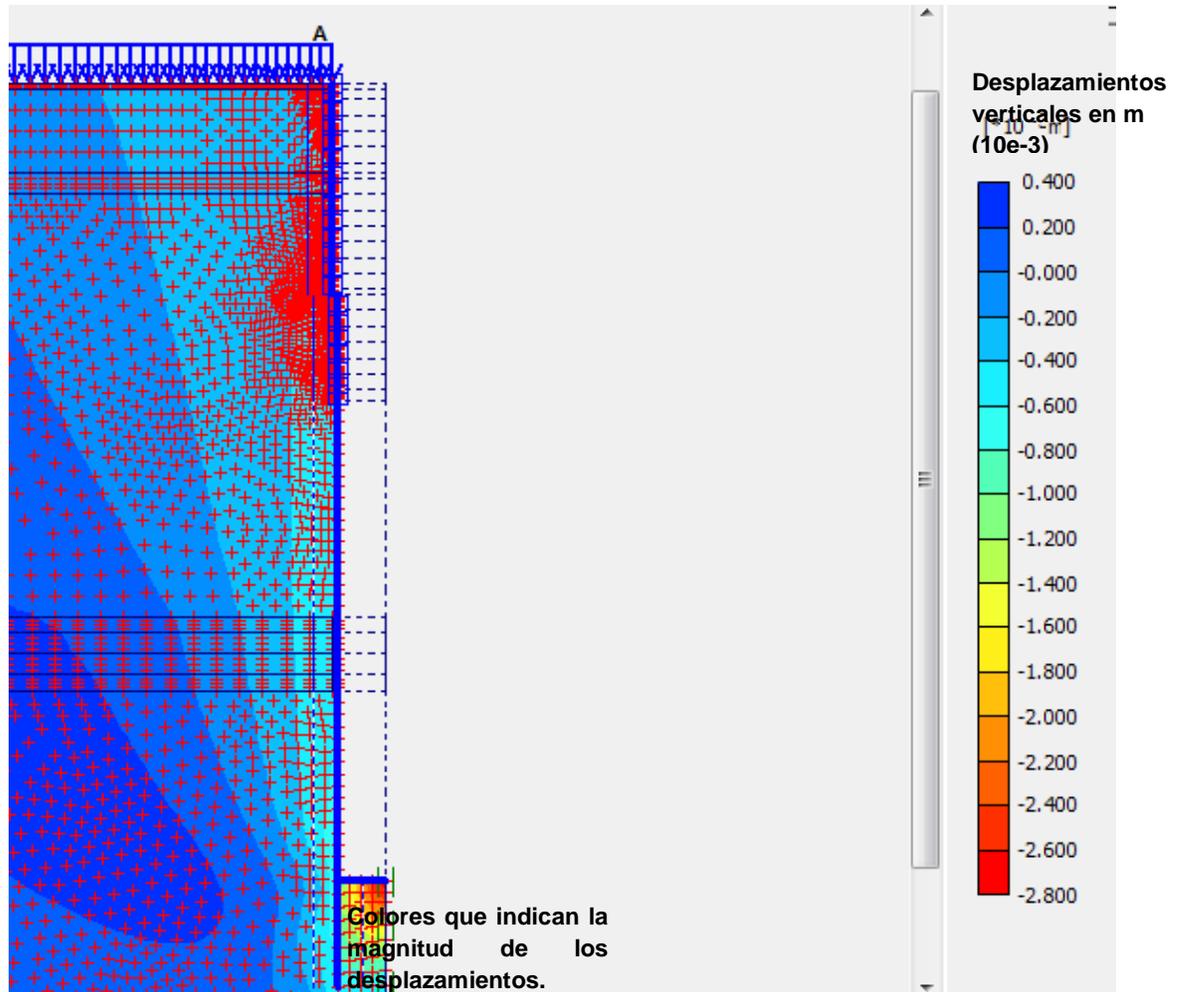
Dentro de la modelación de la segunda etapa de excavación de la lumbrera, se determinaron deformaciones horizontales y verticales.

Las primeras corresponden a las deformaciones producidas por el empuje del terreno sobre la estructura propuesta y las segundas a los posibles asentamientos producidos al abatir el NAF en las inmediaciones de la lumbrera.

Los resultados obtenidos con el programa indican deformaciones mínimas en ambos casos.



(a)



(b)

Figura 39. (a) Deformaciones horizontales, (b) Deformaciones verticales.⁵²

El cálculo del espesor mínimo del ERI-1 se realizó con los momentos actuantes sobre el muro Milán, éstos se presentan en la figura 9 del anexo así como los cálculos relativos al espesor del muro, definiéndose un espesor mínimo de 1 m.

6.3.8 Estabilidad por flotación de la estructura

Al concluir la construcción total de la lumbrera, ésta se encuentra sometida al empuje de Arquímedes que puede producir flotación de la estructura. Las fuerzas que contrarrestan a la subpresión son el peso de la estructura de la lumbrera (densidad y geometría:

⁵² PLAXIS V8.2



espesores del concreto lanzado, del elemento ERI-1 de la losa y del tapón base), así como de la resistencia por fricción que se desarrolla en el contacto exterior de las estructuras (concreto-suelo).

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

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

Donde:

- W Peso de la estructura (losa, muros y pantallas),
- F_{fricc} Fuerza de fricción que se opone a la flotación y
- F Fuerza de flotación.

Sustituyendo los valores en la expresión anterior nos da un factor de seguridad igual a $FS = 7.90$, siendo estable la lumbrera (FS mínimo = 1.5) (los cálculos se muestran en el Anexo).

6.3.9 Estabilidad por sismo de la lumbrera

Si bien, las estructuras subterráneas son menos vulnerables a los movimientos sísmicos que las estructuras superficiales, es necesario garantizar la seguridad de la obra ante los movimientos del terreno esperados en el sitio del proyecto.

Uno de los primeros métodos desarrollados, para el análisis de la estabilidad sísmica de un corte o talud es el análisis pseudo-estático⁵³, en el cual, la acción sísmica es representada por una fuerza estática, correspondiente al peso del suelo anexo al talud multiplicado por un coeficiente sísmico c ; La fuerza pseudo-estática es utilizada en un análisis convencional de equilibrio límite y se considera como un vector que actúa en dirección horizontal, las fuerzas verticales no son utilizadas en este método.

⁵³ J. M. Duncan, S.G. Wring, Soil strength and slope stability, USA, 2005



Una cuestión importante, es la ubicación de la fuerza, Terzaghi (1950) sugiere que ésta debe actuar a través del centro de gravedad de la masa de suelo deslizante.

La lumbrera se clasifica como una estructura del grupo A, los parámetros sísmicos de la zona, se obtuvieron por medio del programa PRODISIS de la CFE.

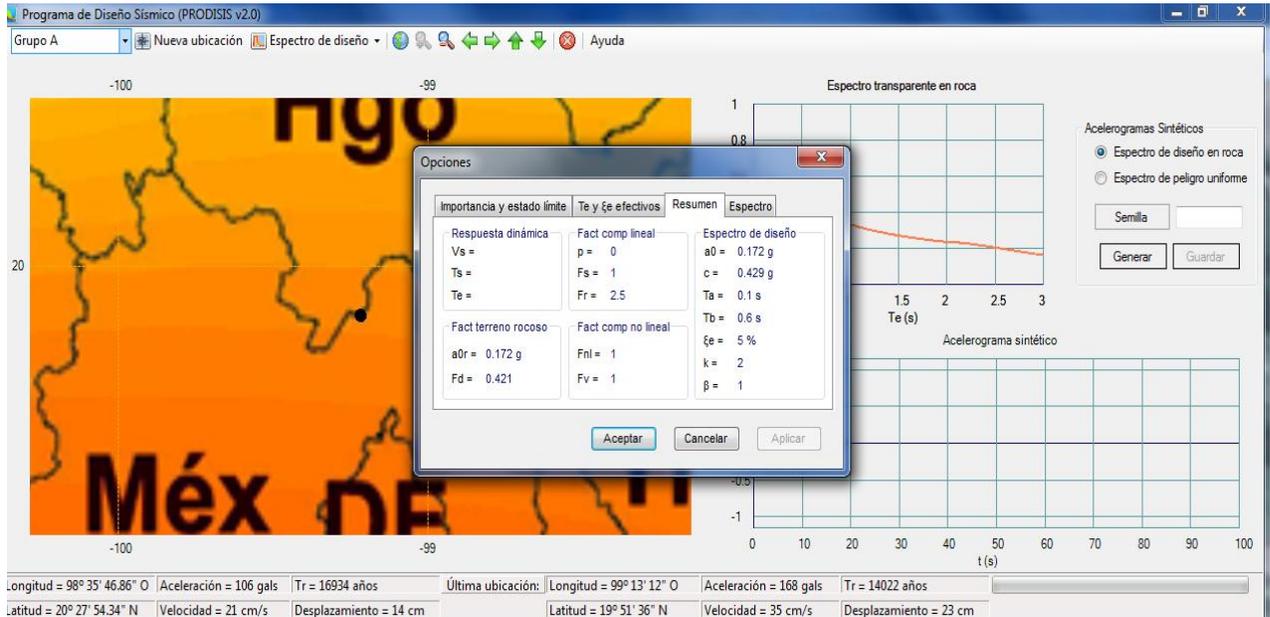


Figura 40. Parámetros sísmicos obtenidos del PRODISIS.

Los resultados proporcionados por el programa indican una aceleración pico en roca (a_0) de 0.172 g, meseta espectral (c) de 0.429 g y una velocidad de cortante (β_0) de 3500 m/s.

Para realizar el análisis se revisó la figura 28, en la cual se presenta el mecanismo potencial de falla determinado en el análisis numérico de la lumbrera, el área que desliza como cuerpo rígido, cuenta con las siguientes dimensiones: base de 115 m, altura de 112 m y el peso volumétrico ponderado de 17 kN/m³.

El peso de la cuña de deslizamiento (W) es 109,480 kN, para calcular la fuerza sísmica, se multiplica el peso W por el coeficiente sísmico (c) afectado por un factor de reducción Q el cual, es igual a 2 indicado en las NTC Sismo del D.F (ecuación siguiente).

$$\text{Fuerza Sísmica} = (c/Q) W^1 = (0.429/2) 109,480 = 23,483 \text{ kN}$$



Condiciones generales de modelación

La modelación del presente análisis siguió los lineamientos del capítulo anterior, la fuerza sísmica fue representada como una carga puntual a un tercio de la altura total del área.

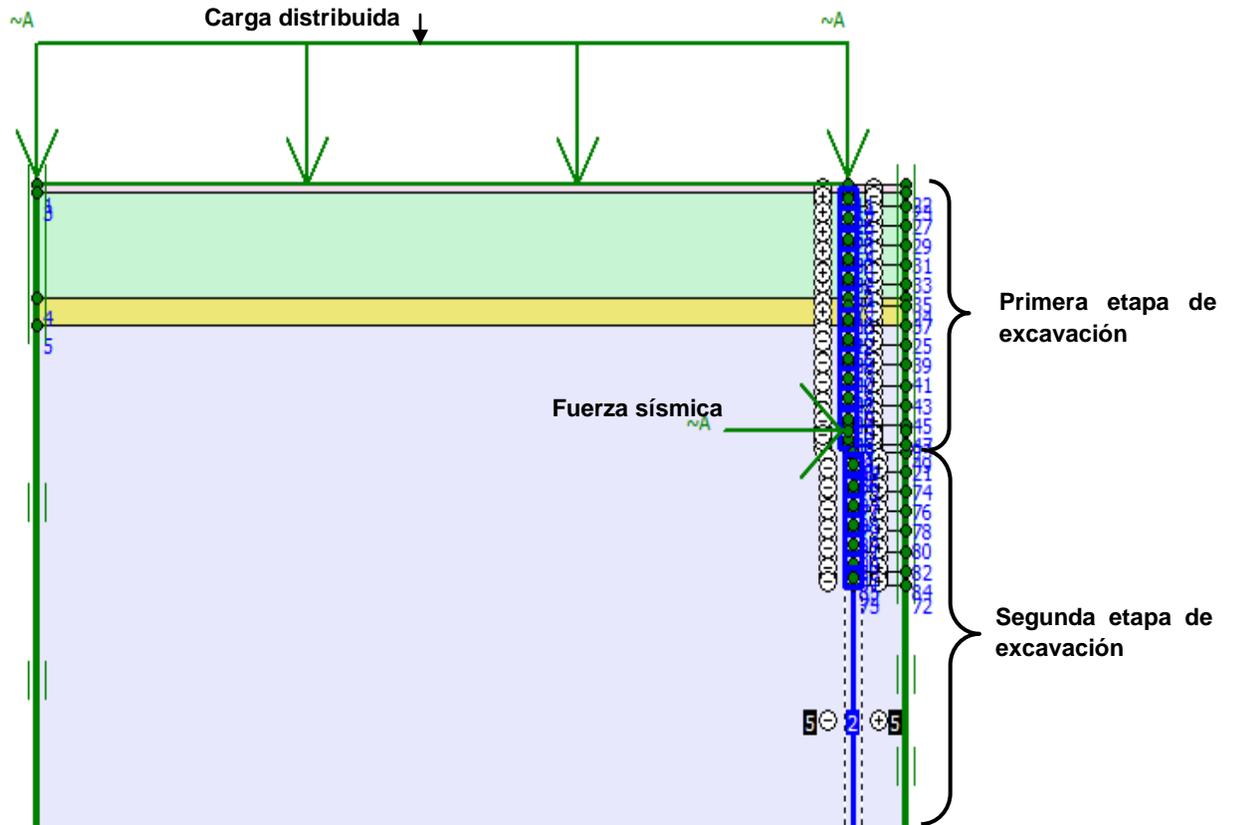


Figura 41. Fuerza sísmica representada en el modelo numérico.⁵⁴

Resultados e interpretación

El FS se obtuvo con el programa, usando la herramienta “phi-c reduction”, obteniendo como Factor un valor de 1.40, considerando éste como satisfactorio para la revisión de la estabilidad por sismo.

⁵⁴ PLAXIS V8.2



6.4 Estados límite de servicio

Desplazamientos inducidos por la construcción.

Al analizar el procedimiento constructivo con el modelado numérico durante la construcción de las dos etapas de excavación (Anillos prefabricados y ERI-1), los desplazamientos verticales en la superficie fueron de 4 cm.

Los desplazamientos verticales calculados para el fondo de cada etapa de excavación fueron de 2 y 0.5 cm. Considerando estos resultados como satisfactorios.

6.5 Datos geotécnicos para el diseño estructural de la lumbrera

Con los resultados de los análisis geotécnicos efectuados se obtuvieron parámetros para el diseño estructural de la lumbrera, como datos importantes tenemos los empujes horizontales totales sobre el corte (figura 27) y las deformaciones producidas en cada etapa de construcción de la lumbrera (figuras 35 y 39), ambos datos se relacionan para obtener el Módulo de reacción lateral estático ($K = \sigma_H / \delta$), útil para el diseño estructural de los elementos de retención vertical de la estructura.

Con el planteamiento del ERI-1 como una trabe doblemente empotrada se obtienen con el uso del programa PLAXIS V8.2 los momentos actuantes sobre el elemento de retención calculando un espesor aproximado del muro Milán, el diagrama de momentos se presenta en la figura 9 del anexo.

7.0 Sistema constructivo de la lumbrera 20

7.1 Sistema constructivo, primera etapa de construcción

En base a los análisis realizados el sistema de construcción adecuado para la primera etapa de excavación de la lumbrera 20, es el método de anillos prefabricados.

A continuación se describirá en forma general, el procedimiento constructivo a realizar:

- El primer paso consiste, en la construcción de un brocal en la superficie de la lumbrera, el cual servirá de guía para la excavación del núcleo central de la lumbrera, el brocal debe contar con las preparaciones necesarias (placas metálicas), para la fijación de una serie de traveses guías metálicas, las cuales se colocan de forma vertical y son utilizadas como “rieles” para la instalación de los anillos prefabricados. Para dichos trabajos el brocal debe ser lo suficientemente estable para soportar tanto los anillos y la estructura metálica.

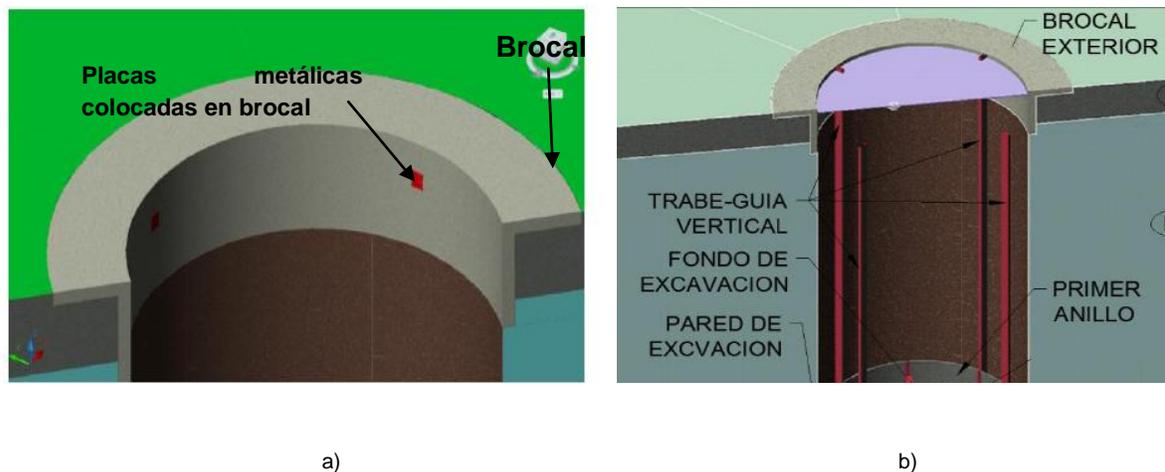


Figura 42. a) Brocal con placas metálicas para fijado de estructura metálica, b) Traveses-guías verticales.⁵⁵

⁵⁵ Auvinet, Zemva, 2do Simposio Internacional sobre túneles y lumbreras en suelos y roca, Construcción de lumbreras con anillos prefabricados en arcillas blandas del Valle de México, México 2012

- Al inicio de la excavación del núcleo central, se vierte dentro de la excavación el lodo de perforación el cual, es una mezcla de bentonita y agua, para evitar el colapso y cierre de la trinchera, asegurando la estabilidad de las paredes y el fondo de la excavación, minimizando los desplazamientos del suelo, la excavación se continúa hasta llegar a los 40 m de profundidad.
- Al concluir la excavación hasta los 40 m de profundidad, se colocan las traveses verticales fijándolas a las placas colocadas con anterioridad en el brocal, debiéndose colocar perfectamente niveladas y rectas, con el fin de ingresar los anillos entre ésta estructura.
- El primer anillo es introducido hasta el fondo de la excavación (40 m de profundidad), éste será colado en una losa de fondo provisional con un $f'c = 150 \text{ kg/cm}^2$ con el fin de facilitar su posterior demolición, dicho anillo se reforzará con una estructura de traveses radiales tipo estrella para rigidizar la estructura metálica vertical instalada.

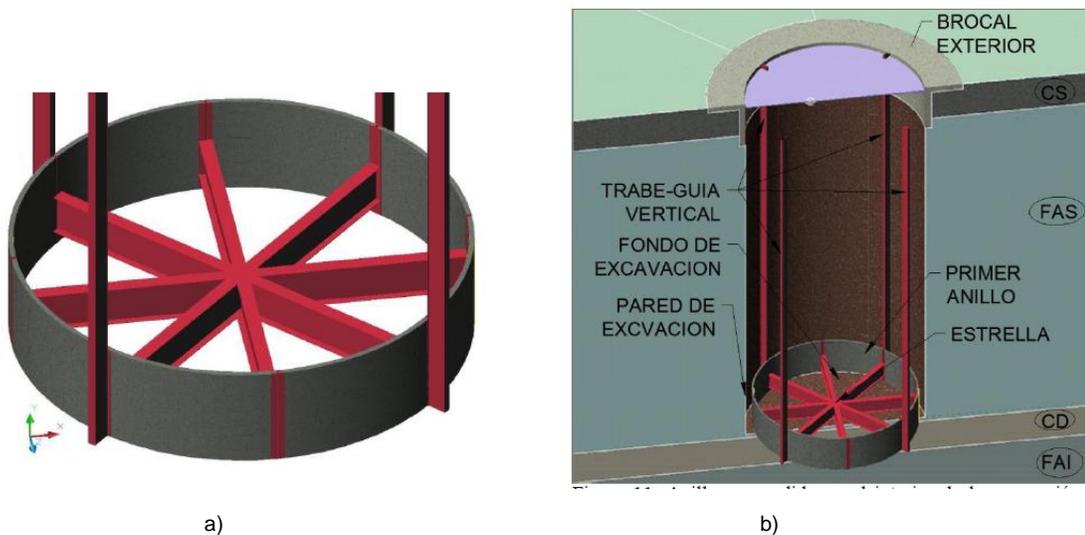


Figura 43. a) Primer anillo prefabricado reforzado, b) Colocación del primer anillo hasta el fondo de la excavación.⁵⁵

- Después de colar la losa de fondo y alcanzando ésta el 80% de su resistencia a la compresión, se procede a la colocación de los anillos en toda la altura de la

lumbreira, terminado su colocación se procede a rellenar el espacio anular entre las paredes de la excavación y los anillos, utilizando estos últimos como cimbra.

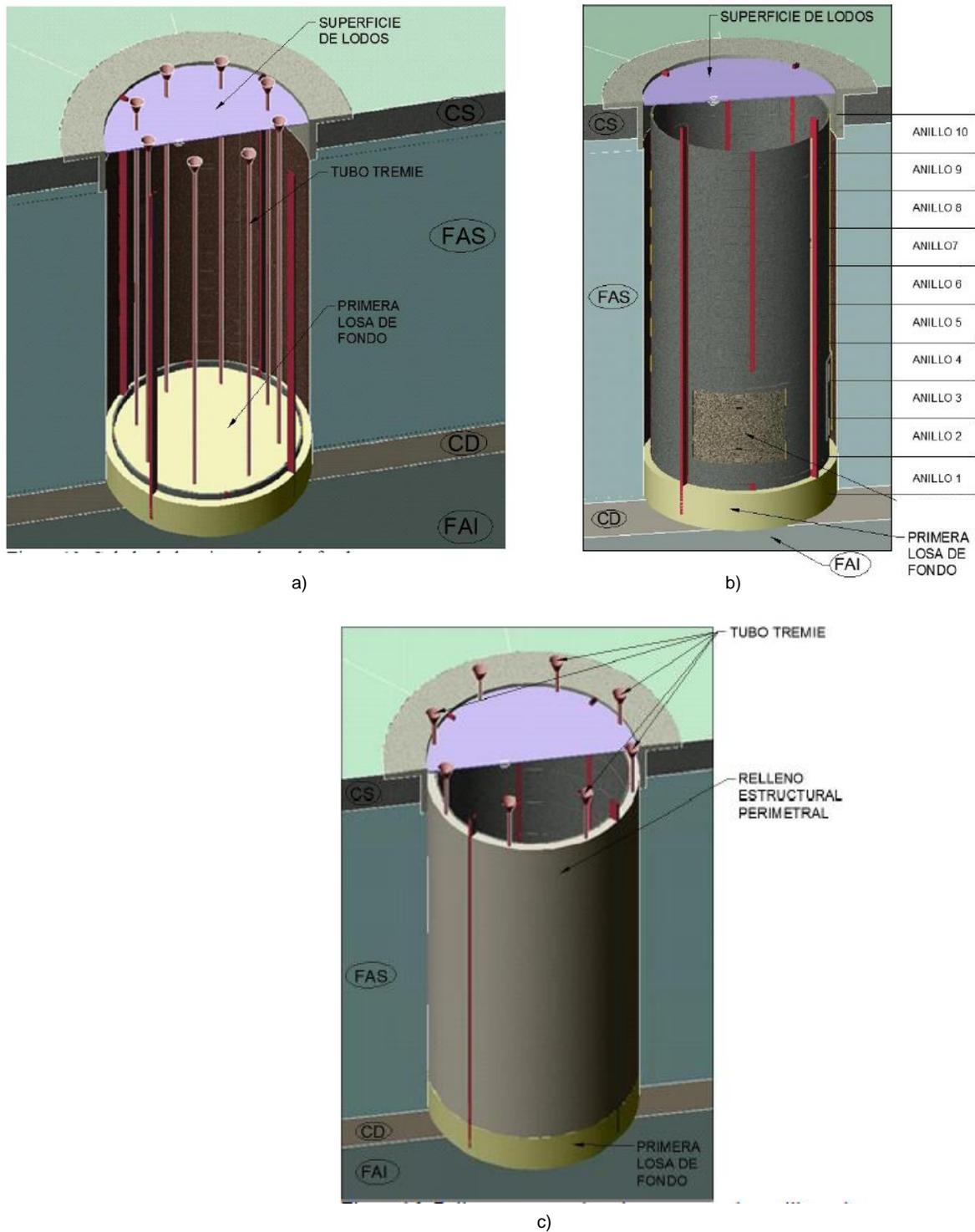


Figura 44. a) Colado de losa fondo de la lumbreira, b) instalación de anillos superiores, c) Relleno del espacio anular.⁵⁵



- El colado anular se debe realizar con mortero de alta fluidez o con una mezcla bentonita-suelo-cemento-agua el cual, deberá alcanzar una resistencia adecuada, para constituir, en combinación con los anillos prefabricados el revestimiento primario de la lumbrera.
- Al momento de alcanzar el relleno el 80 % de la resistencia de diseño, se retiran los lodos de la excavación y se procede al calafateo de las juntas entre los anillos.

7.2 Sistema constructivo, segunda etapa de construcción^{56, 57}

A continuación se describirá en forma general, el procedimiento constructivo a realizar:

- Al finalizar la construcción de la primera etapa de excavación y después del retiro los lodos, se procede a marcar sobre la losa de cimentación provisional (40 m de profundidad) las cuerdas de la circunferencia de la L20 (Diámetro interior = 16 m), la cual es un segmento de recta y cuya longitud quedará definida por el ancho de la hidrofresa por utilizar (revizando el equipo adecuado para excavaciones de grandes profundidades y su disponible en el mercado).
- Al finalizar el trazo de las cuerdas de la circunferencia de la L20 se procede a la demolición de los segmento de recta de forma alternada (tresbolillo) y utilizando la losa de fondo provisional como brocal.
- Con el primer tramo de cuerda ya demolida sobre la losa de fondo se procede a iniciar los trabajos de excavación de los tableros de los muros diafragma, debiéndose sustituir en todo momento el material excavado por lodo bentonítico.
- Para la excavación de los tableros se empleará la técnica de la hidrofresa, la cual es un elemento excavador con ruedas dentadas que giran en sentidos contrarios,

⁵⁶ <http://www.conagua.gob.mx/sustentabilidadhidricadelvalledemexico/avancesretos.aspx>.

⁵⁷ CNA, Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento, Geotecnia en construcción especializada, México, Diciembre 2007.

arrancando el terreno. La elevada fricción que se produce en las ruedas dentadas, hace necesaria la refrigeración de las mismas, así como de los suelos y roca. Para ello se emplea como líquido refrigerante el lodo bentonítico también utilizado para la estabilización de las paredes de la excavación, este se inyecta mediante un dispositivo de la propia máquina. Los lodos se mezclan con los materiales excavados, gracias a lo cual se extraen del fondo de la zanja.



Figura 45. Hidrofresa, excavadora vertical⁵⁸

- Dado que los lodos se recirculan para permitir esta extracción, han de ser "reciclados" o limpiados mediante la eliminación de los restos de terreno extraídos de la excavación.

⁵⁸ <http://www.conagua.gob.mx/sustentabilidadhidricadelvalledemexico/avancesretos.aspx>.



Figura 46. Recirculación de lodos en excavación de tableros⁵⁹

- La hidrofresa a utilizar será auto-guiada con el objetivo específico de excavar zanjas profundas, la cual se opera por medio de cables y un cuerpo metálico que le sirve de guía para mantener el alineamiento y la verticalidad durante la excavación. Tienen la característica de que pueden alcanzar grandes profundidades ya que sólo dependen de la longitud de los cables.
- Al iniciar con la excavación de la zanjas perimetrales se debe proceder al abatimiento del NAF, por lo menos a 10 m por debajo del nivel de desplante de la losa de fondo (158 m).
- El espesor mínimo calculado del muro Milán es de 1 m, el cual se ampliará para absorber las expansiones y contracciones estudiadas en el comportamiento de la estabilidad de la excavación de la zanja perimetral y el núcleo central. Revisando el inciso 6.3.7.1 se determina un espesor de 1.30 m.
- Después de terminada la excavación y previo a la instalación del acero de refuerzo se instala la junta constructiva, piezas generalmente metálicas que constan de un cuerpo tubular de sección rectangular, de ancho igual al muro Milán, que sirve de respaldo y rigidizador a la parte de la junta que deja una huella en el concreto del

⁵⁹ <http://www.conagua.gob.mx/sustentabilidadhidricadelvalledemexico/avancesretos.aspx>.

tablero. Esta parte es trapezoidal y en algunos casos tiene un pequeño canal para alojar una banda de PVC usada como sello entre tablero y tablero. Se aclara que estas juntas se emplean en tableros alternados.

Las juntas se emplean para moldear las juntas de los tableros del muro, para lograr el machiembrado entre ellos.

La juntas se deben de extraer al momento de término del colado, cuando el concreto inicie su fraguado.

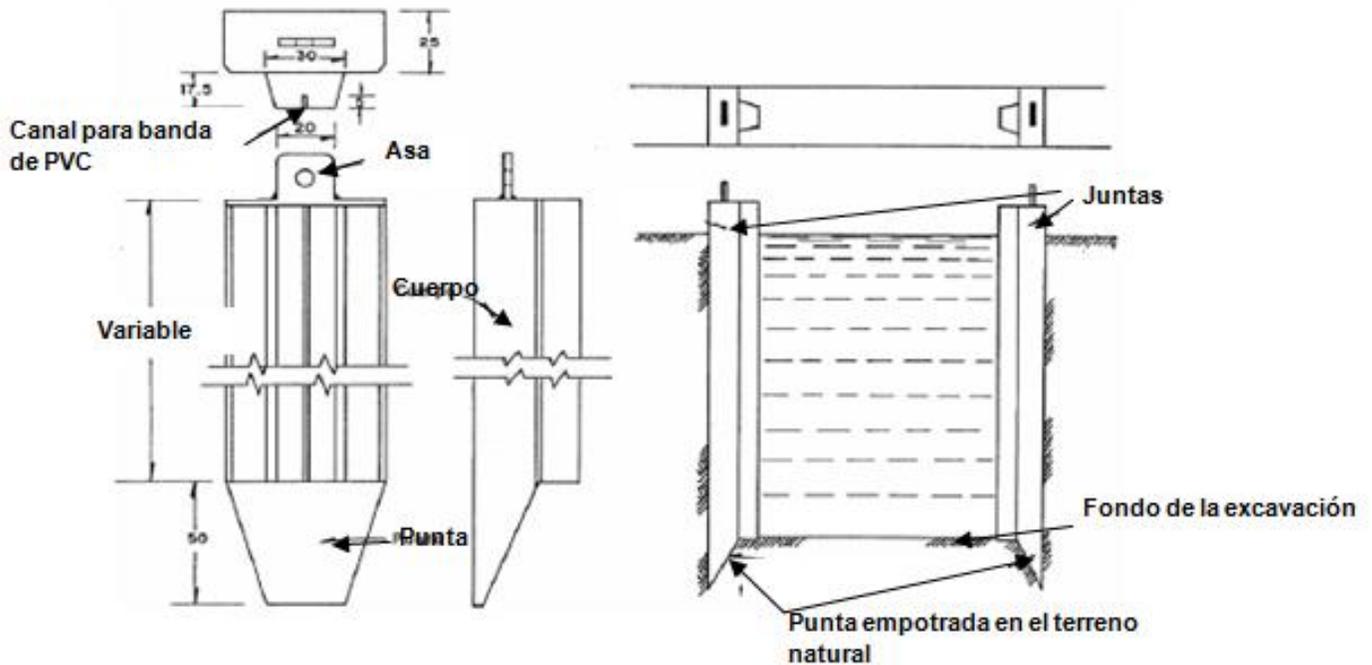


Figura 47. Junta de muro Milán⁶⁰

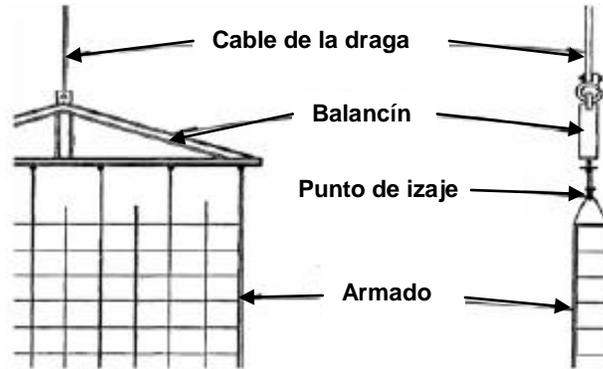
- Al corroborar los niveles, la verticalidad y el espesor de la zanja se procede a bajar el acero de refuerzo a la perforación, el armado debe tener un ancho inferior al de la pared en unos 10 cm aproximadamente, además es necesaria la instalación de un número suficiente de centradores (rodillos o patines). Una vez colocada la

⁶⁰ CNA, Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento, Geotecnia en construcción especializada, México, Diciembre 2007.

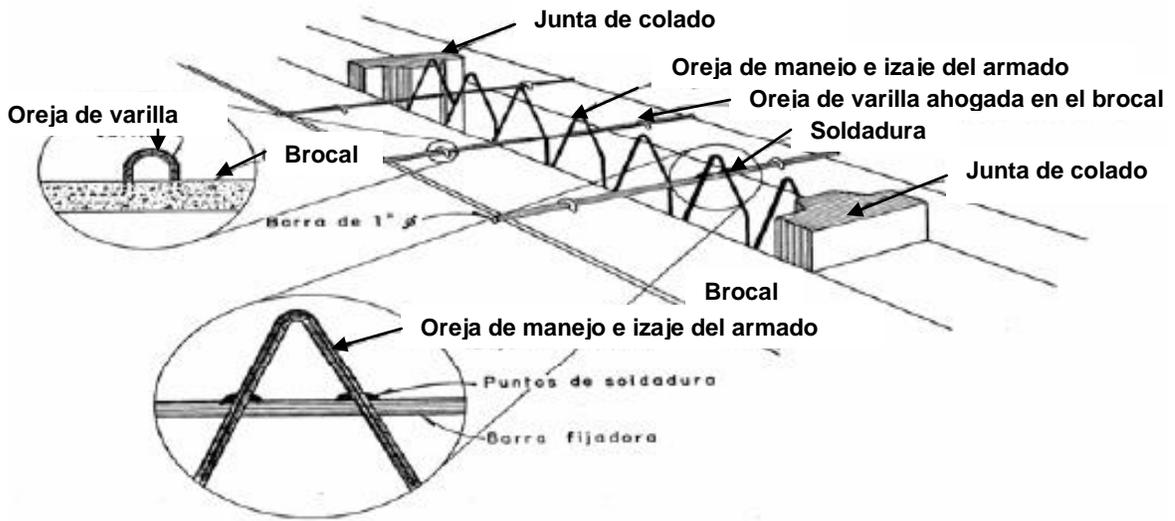


parrilla se debe amarrar al brocal por medio de unas orejas, para evitar su flotación durante el colado.

Bajado del acero de refuerzo a la zanja



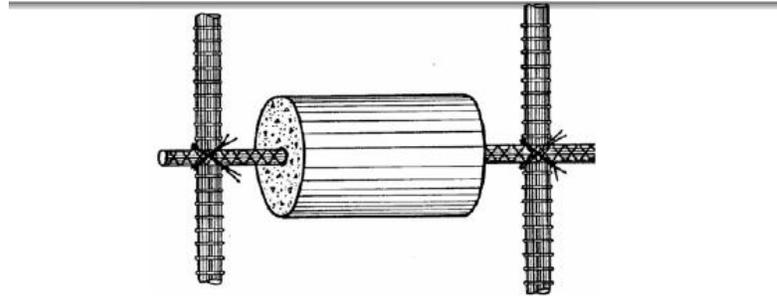
a) Manejo de armados



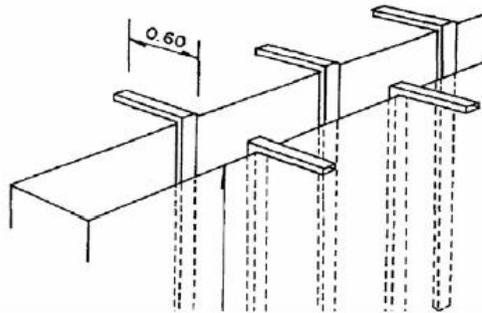
b) Anclaje del acero de refuerzo

Figura 48. Detalle de la colocación de armados.⁶¹

⁶¹ CNA, Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento, Geotecnia en construcción especializada, México, Diciembre 2007.



a) Rodillos de concreto (pollos fijos)



b) Tubulares (patines)

Figura 49. Centraores⁶²

- Ya instalado el armado se vacía el concreto para el muro Milán, el cual no se vibra y se realiza por medio de tubería tremie (columna de vaciado o trompa) bajo agua o lodo. La operación de vaciado no debe ser interrumpida y debe hacerse en una sola operación.

⁶² CNA, Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento, Geotecnia en construcción especializada, México, Diciembre 2007.

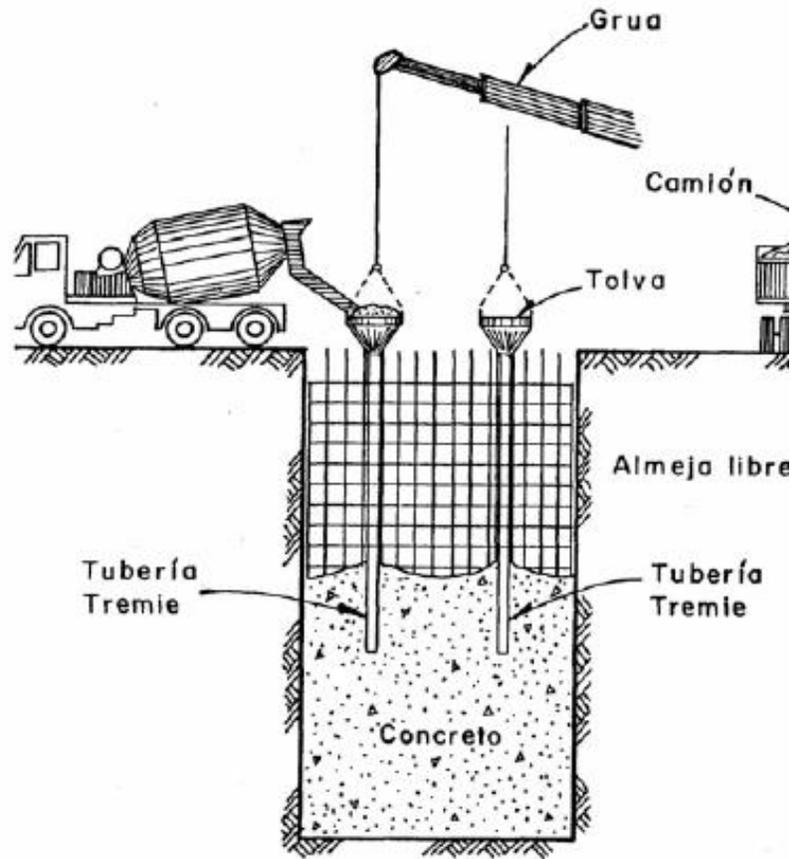


Figura 50. Secuencia de construcción de tableros para muros Milán⁶²

- Al completarse la totalidad de los tableros del muro Milán y al momento de contar los muros con una resistencia a la compresión de por lo menos el 80% de su resistencia de diseño (80% f_c), se procede a la excavación del núcleo central. La cual se realiza en una primera etapa de los 40 a 60 m de profundidad y en fases parciales de 3 m, con el fin de instalar una serie de anillos rigidizadores en cada una de éstas.

Para la colocación de los anillos se debe considerar dejar una serie de placas metálicas ahogadas en el armado de los muros Milán, el material de los anillos por consiguiente debe ser acero estructural dado la versatilidad de éste material.

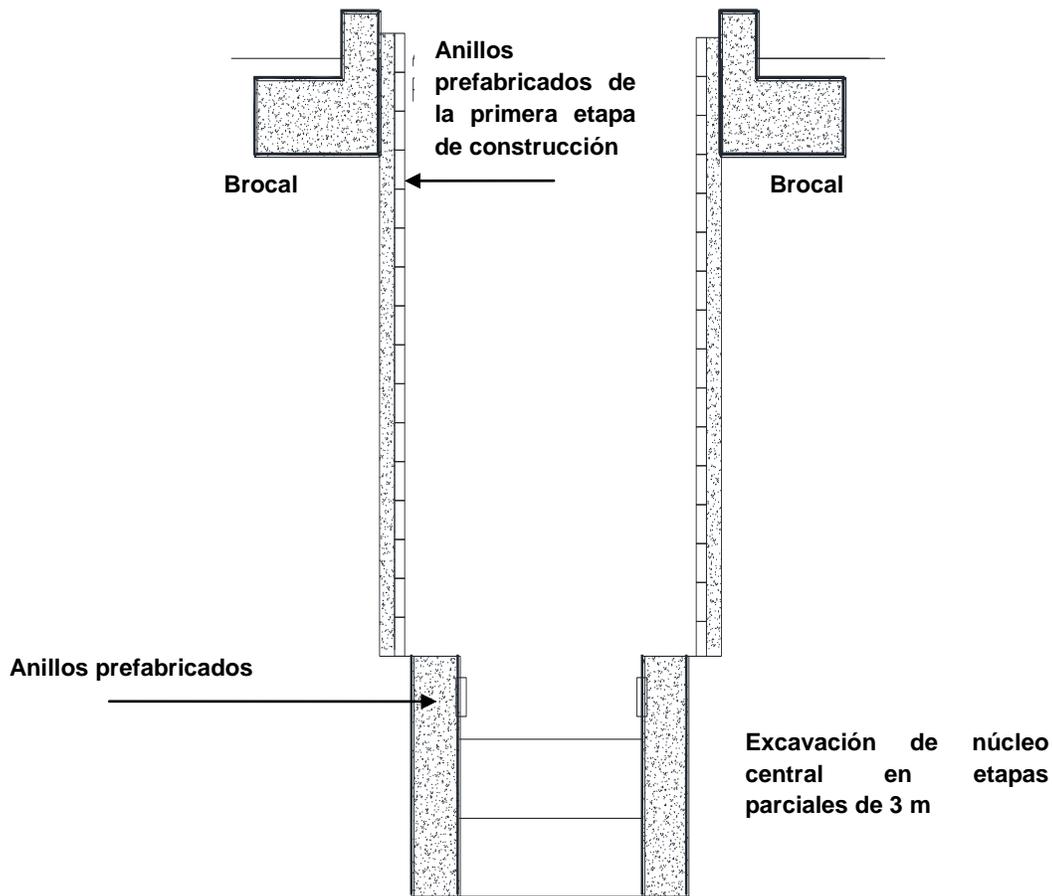


Figura 51. Excavación por etapas en núcleo central, para la instalación de anillos prefabricados en muro Milán de los 40 a los 62 m de profundidad.

- Al completarse la instalación de los anillos se reanuda la excavación del núcleo central, dicha excavación se realizará a cielo abierto con almeja hidráulica, los últimos metros de ésta deberán detallarse manualmente para la futura construcción de la losa de fondo.
- El armado de la losa de fondo se instalará sobre una plantilla de concreto pobre, además el armado de la losa de fondo debe traslapar con el acero de refuerzo de los muros Milán ya sea por medio de preparaciones instalados en el armado de los muros o taquetes epóxicos, el objetivo de lo anterior es empotrar ambos elementos, al término de éstas actividades, se procede a colar una losa de 2 m de espesor.



CONCLUSIONES

- La lumbrera 20, se ubica en la sexta etapa del TEO, ésta se localiza al Noroeste de la cuenca del Valle de México, en los linderos de los municipios de Huehuetoca, Tepeji del Río y Tula de Allende, de los estados de México e Hidalgo, la zona se considera una llanura del Río Tula y está situada en la región geográfica del Valle del Mezquital.
- En base a las especificaciones técnicas de la CONAGUA, el proyecto de la lumbrera 20 cuenta con las siguientes dimensiones: Diámetro y altura interior de 16 m y 148.17 m respectivamente.
- Los depósitos del sitio de estudio son del tipo lacustre, formados por mezclas e intercalaciones de arcillas, limos y arenas provenientes de la desintegración de rocas volcánicas pre-existentes, abanicos aluviales, materiales piroplásticos y suelos residuales.
- La cantidad de muestras extraídas en la campaña de exploración fueron las siguientes: 120 m de Penetración Estándar, 47 m de barril tipo NQ y 20 m de sondeos inalterados realizado con tubo Shelby.
- Con los sondeos directos realizados se clasificó el suelo de la lumbrera como de arcillas y limos de alta plasticidad de consistencia dura, el NAF se detectó a una profundidad promedio de 65 m.
- Con base en los resultados de exploración geotécnica se propuso un sistema constructivo, la revisión de éste, se efectuó en base a las Normas Técnicas Complementarias para el Diseño de Cimentaciones del Reglamento de Construcciones vigente en el Distrito Federal (NTC C RCDF) así como a la modelación matemática del procedimiento constructivo en un programa de elementos finitos PLAXIS V8.
- El procedimiento constructivo por utilizar consta de dividir la excavación de la lumbrera en dos etapas, la primera inicia en la superficie hasta los 40 m de



profundidad, la estabilización de la primera etapa se realizará con el sistema de anillos prefabricados.

- Para iniciar con los trabajos de la segunda etapa de excavación se debe proceder al abatimiento del NAF para evitar problemas con la subpresión, el abatimiento debe ser por lo menos 10 m por debajo del nivel de desplante de la losa fondo de la lumbrera.
- La segunda etapa de excavación, inicia a los 40 m de profundidad hasta la máxima profundidad de excavación (152m). El sistema de estabilización se realizará con un elemento de retención interior (ERI-1), el cual, generará un acuífero confinado donde se eliminará el flujo de agua al interior de la lumbrera y a la vez contendrá los flujos plásticos y empujes generados al momento de realizar la excavación del núcleo central.
- Los sistemas de construcción propuestos fueron revisados dentro de sus estados límites de falla y de servicio con base a las NTC C RCDF y su modelación numérica realizada con el programa PLAXIS V8, obteniendo resultados satisfactorios con factores de seguridad adecuados y una predicción aproximada de su futuro comportamiento.



ANEXOS



Figura 1. Ubicación Lumbra 20 (Google Earth 2012).

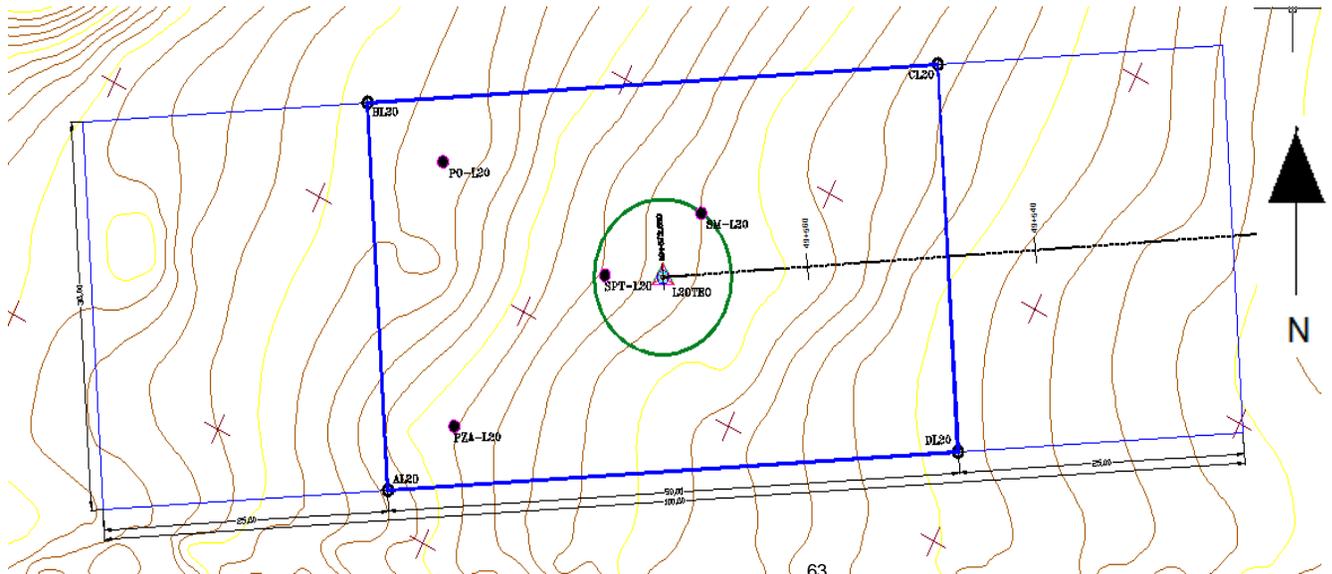


Figura 2. Polígono de influencia de la lumbra ⁶³

⁶³ Fuente: Elaborado para la CONAGUA por la Subgerencia de Geotecnia y Materiales de la CFE, México 2009, Estudio de Factibilidad Técnica e Ingeniería Básica para la Elaboración del Proyecto Ejecutivo y la Construcción del Túnel Emisor Oriente, ubicado en el Distrito Federal y los estados de México e Hidalgo.



Figura 3. Mapa Sísmico de la República Mexicana ⁶⁴

Zonas:

A: Zona donde no se tienen registros históricos de sismos.

B y C: Zonas intermedias, donde se registran sismos no tan frecuentemente o son zonas afectadas por altas aceleraciones pero que no sobrepasan el 70% de la aceleración del suelo.

D: Zona de sismos frecuentes.

⁶⁴ www.ssn.unam.mx ,Servicio Sísmico Nacional 2011

Localización de piezómetro

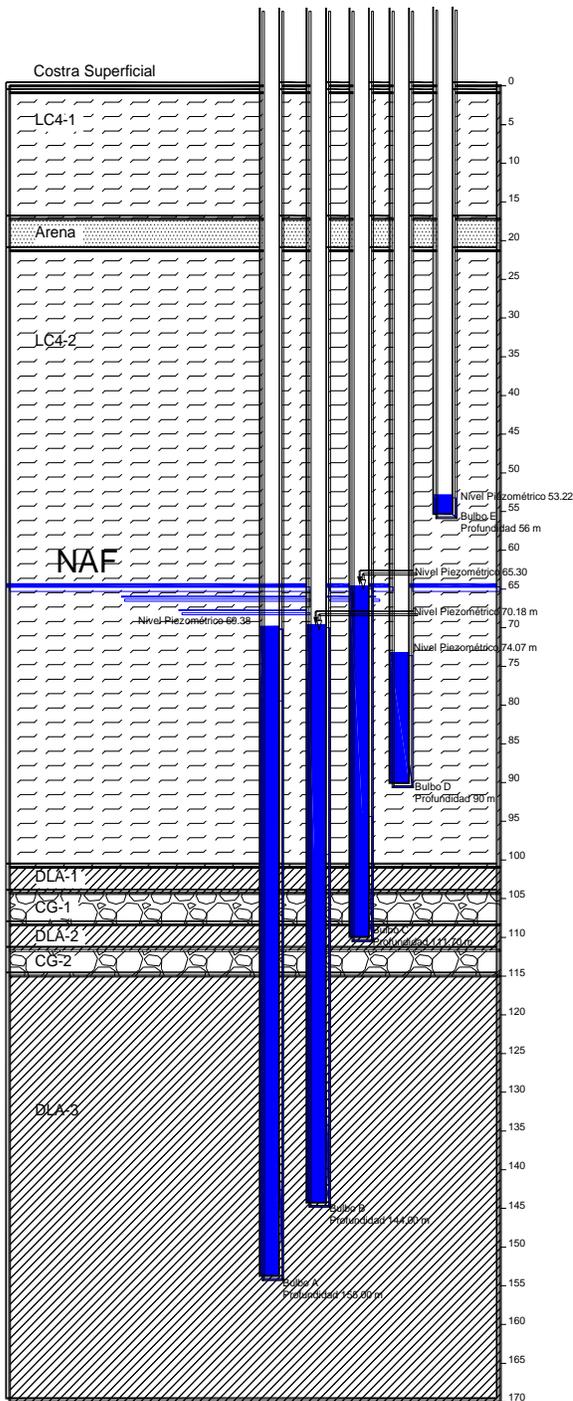


Diagrama de presiones hidráulicas (kPa)

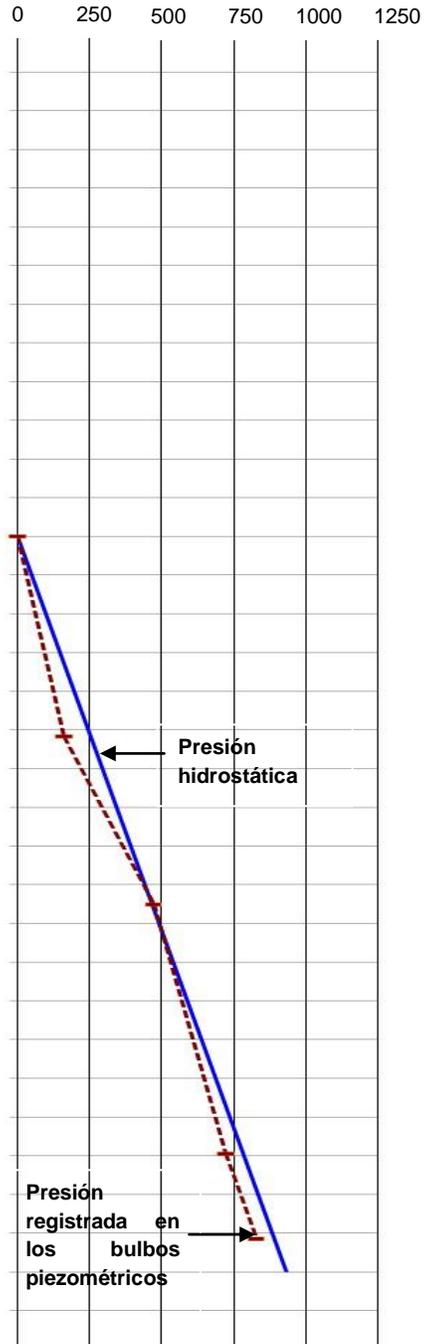


Figura 4. Localización de piezómetros en la lumbrera 20 y diagrama de presiones hidráulicas.⁶³

Tabla 1. Resumen de las pruebas realizadas y su normatividad vigente⁶³

Prueba	Símbolo	Norma aplicable
Clasificación visual y al tacto en estado húmedo y seco, según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos	SUCS	LMS-001 "Clasificación de suelos en campo y laboratorio" 2000. Procedimiento de CFE, basado en las Normas ASTM D 4318-84, D 2487-85 y D 2488-84
Contenido natural de agua	w (%)	LMS-002 "Determinación del contenido de agua en materiales térreos", 2000. Procedimiento de CFE, basado en la Norma ASTM D 2216-98.
Densidad de sólidos	G _s	LMS-007 "Determinación de la densidad de sólidos de los suelos", 2000. Procedimiento de CFE, basado en la Norma ASTM D 854-83.
Análisis granulométrico por mallas	Gr	LMS-004 "Análisis granulométrico por mallas", 2000. Procedimiento de CFE, basado en la Norma ASTM D 422-72.
Porcentaje de finos (lavado malla #200)	%F	LMS-005 "Determinación de la granulometría en suelos finos", 2000. Procedimiento de CFE.
Límites de consistencia (líquido y plástico)	LL,LP	LMS-003 "Límites de consistencia", 2000. Procedimiento de CFE, basado en la Norma ASTM D 4318
Prueba de compresión simple en pruebas estándar (3,8 cm de diámetro) y en muestras de 10 cm de diámetro.	q _u	LMS-022 "Prueba de compresión no confinada", 2006. Procedimiento de CFE y ASTM D2167
Prueba triaxial no consolidada no drenada (UU)	TX UU	LMS-024 "Prueba de compresión triaxial con deformación controlada", 2000. Procedimiento de CFE.

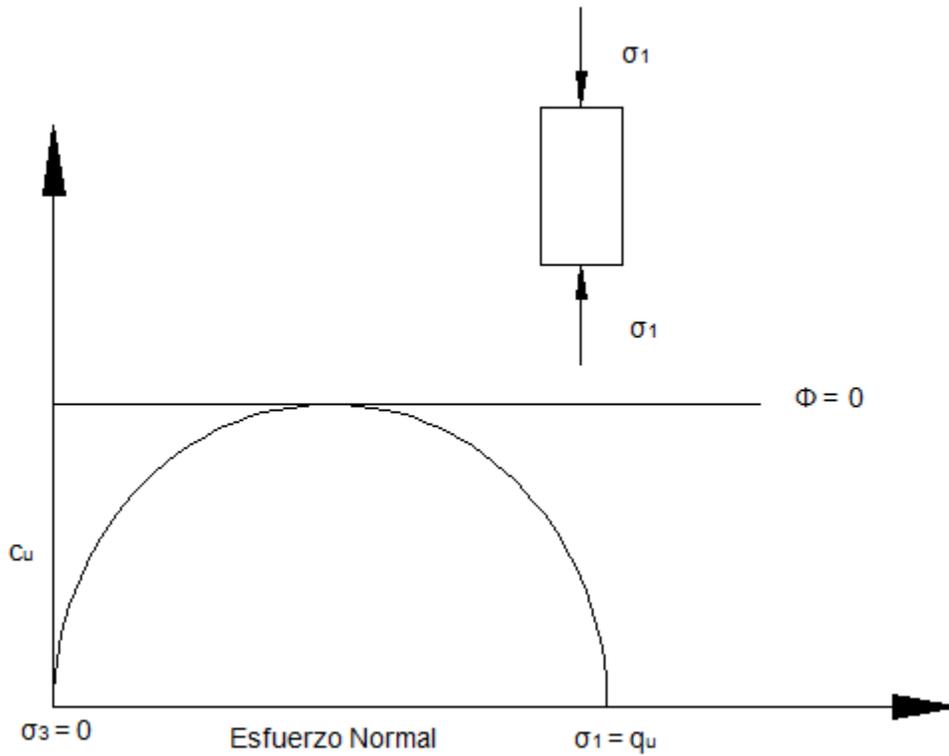


Figura 5. Prueba de compresión simple

Tabla 2. Consistencia en función de la compresión simple (Terzaghi y Peck, 1985).

Consistencia del suelo	kPa
Muy blanda	<25
Blanda	25-50
Media	50-100
Firme	100-200
Muy firme	200-400
Dura	>400



Tabla 3. Tabla resumen de resultados obtenidos en el laboratorio.⁶³

Muestra	Profundidad median (m)	w _n	w _p	w _L	% A	% F	SUCS	G _s	N _{prom}	Compresión simple		Triaxial UU		γ _n (kN/m ³)		E ₅₀	
										q _u	s _u	s _u	Ø	q _u	TX UU	q _u	TX UU
										kPa	kPa	kPa	Grado			MPa	MPa
SPT-5	1.85	20	23	32	41	59	ML Limo de baja plasticidad	--	>50	--	--	--	--	--	--	--	--
SS-1	4.5	50	--	--	5	95	--	--	--	122	61	--	--	--	--	--	--
SPT-11	5.75	37	37	75	6	94	MH Limo de alta plasticidad	--	63	--	--	--	--	--	--	--	--
SS-3	9.3	41	--	--	5	95	--	2.64	--	137	69	--	--	16	--	14	--
SS-4	9.5	32	28	62	11	89	MH Limo de alta plasticidad	2.64	--	88	44	--	--	17	--	9	--
SPT-26	11.30	30	30	50	23	70	MH Limo de alta plasticidad	--	>50	--	--	--	--	--	--	--	--
SPT-37	16.9	45	--	--	70	30	SP Arena mal graduada	--	24	--	--	--	--	--	--	--	--
SS-7	18.7	50	30	75	80	20	SP Arena mal graduada	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
SPT-64	28.9	33	33	50	3	97	ML Limo de baja plasticidad	--	>50	--	--	--	--	--	--	--	--
SPT-68	29.5	25	25	32	13	87	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
SS-10	39.5	45	35	75	3	97	MH Limo de alta plasticidad	2.57	--	--	--	121	19	--	--	--	25
SPT-86	39.85	45	45	70	2	98	MH Limo de alta plasticidad	--	38	--	--	--	--	--	--	--	--
SS-11	44.3	32	32	63	4	96	MH Limo de alta plasticidad	2.5	--	--	--	229	21	--	--	--	38
SPT-112	50.5	32	28	50	14	86	ML	--	48	--	--	--	--	--	--	--	--
SS-13	56.3	32	25	50	15	85	MH Limo de alta plasticidad	2.49	--	72	36	--	--	18	--	6	--
SPT-139	62.6	28	28	42	27	73	ML	--	>50	--	--	--	--	--	--	--	--
SS-18	70.8	50	30	50	13	87	MH Limo de alta plasticidad	2.52	--	124	62	--	--	15	--	6	--
SPT-156	71	45	30	50	11	89	MH Limo de alta plasticidad	--	84	--	--	--	--	--	--	--	--
SPT-173	78.5	53	28	50	24	76	ML Limo de baja plasticidad	--	42	--	--	--	--	--	--	--	--
SS-21	79.00	40	25	40	48	52	ML Limo de baja plasticidad	2.46	--	530	265	--	--	17	--	50	--
SPT-190	86.15	62	32	62	4	96	MH Limo de alta plasticidad	--	46	--	--	--	--	--	--	--	--
SS-24	87.00	40	25	40	61	39	SM Arena limosa	2.6	--	527	264	--	--	17	--	17	--
SS-26	93.70	32	28	25	68	32	SM Arena limosa	2.52	--	168	84	--	--	17	--	21	--
SPT-206	93.9	50	32	75	17	87	ML Limo de baja plasticidad	--	27	--	--	--	--	--	--	--	--
SS-27	102.5	25	--	--	--	--	--	2.6	--	--	--	430	5	--	--	--	121
SPT-234	110	50	25	50	11	89	CH Arcilla de alta plasticidad	--	NQ	1342	671	--	--	20	--	135.3	--

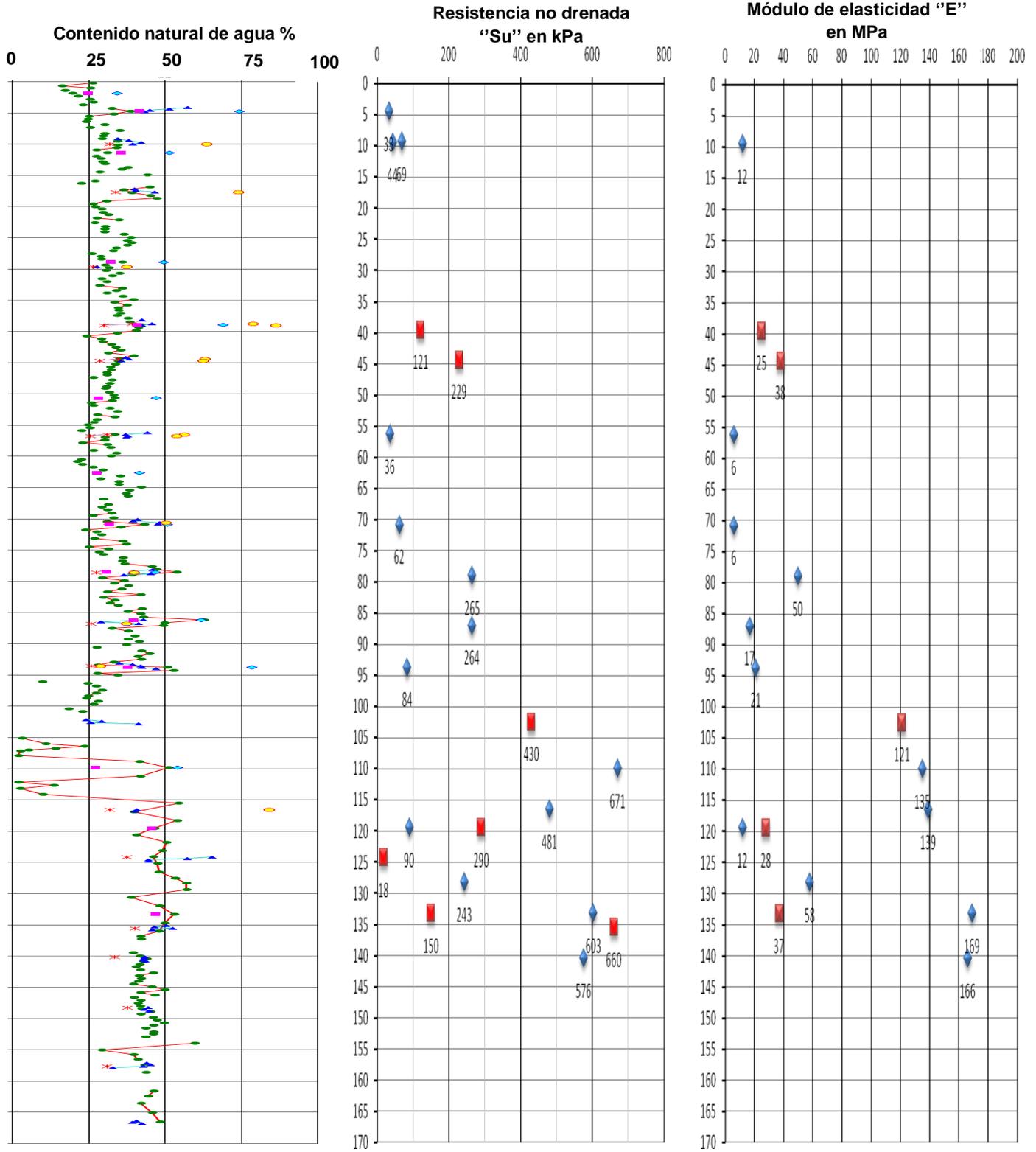


Tabla 4. Tabla resumen de resultados obtenidos en el laboratorio.⁶³

Muestra	Profundidad media (m)	W _n	W _p	W _L	% A	% F	SUCS	G _s	N _{prom}	Compresión simple (CS)		Triaxial UU		γ _n (kN/m ³)		E ₅₀	
										q _u	s _u	s _u	∅	q _u	TX UU	CS	TX UU
										kPa	KPa	KPa	Grado				
SS-28	116.5	35	28	80	1	99	CH Arcilla de alta plasticidad	2.65	--	962	481	--	--	18	--	139	--
SPT-243	119.5	50	--	--	1	99	--	--	--	179	90	290	7	--	--	12	28
SS-29	124.3	65	32	133	1	99	CH Arcilla de alta plasticidad	2.65	--	--	--	18	1	--	--	--	--
SPT-251	128.2	51	--	--	--	--	--	--	NQ	486	243	--	--	16.2	--	58	--
SPT-255	133.2	50	47	50	1	99	CH Arcilla de alta plasticidad	--	NQ	1203	603	150	10	17	--	169	37
SS-30	135.4	50	40	110	0	100	CH Arcilla de alta plasticidad	2.71	--	--	--	660	24	--	--	--	233
SS-31	140.5	33	28	125	1	99	CH Arcilla de alta plasticidad	2.68	--	1152	576	--	--	17.6	--	166	--
SS-32	148.2	40	37	125	0	100	CH Arcilla de alta plasticidad	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
SS-35	158	42	28	100	0	100	CH Arcilla de alta plasticidad	--	--	--	--	--	22	--	--	--	--

Nomenclatura

- w_n Contenido natural de agua en %.
- w_p Límite Plástico en %.
- w_L Límite Líquido en %.
- %A Porcentaje de Arena.
- %F Porcentaje de Finos.
- SUCS Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.
- N_{prom} Número de golpes promedio, obtenido de la prueba de Penetración Estándar (SPT).
- q_u Resistencia a la compresión simple en kPa.
- s_u Resistencia no Drenada UU en kPa.
- ∅ Ángulo de fricción interna obtenido de pruebas UU en grados.
- E₅₀ Módulo de elasticidad en Mpa.

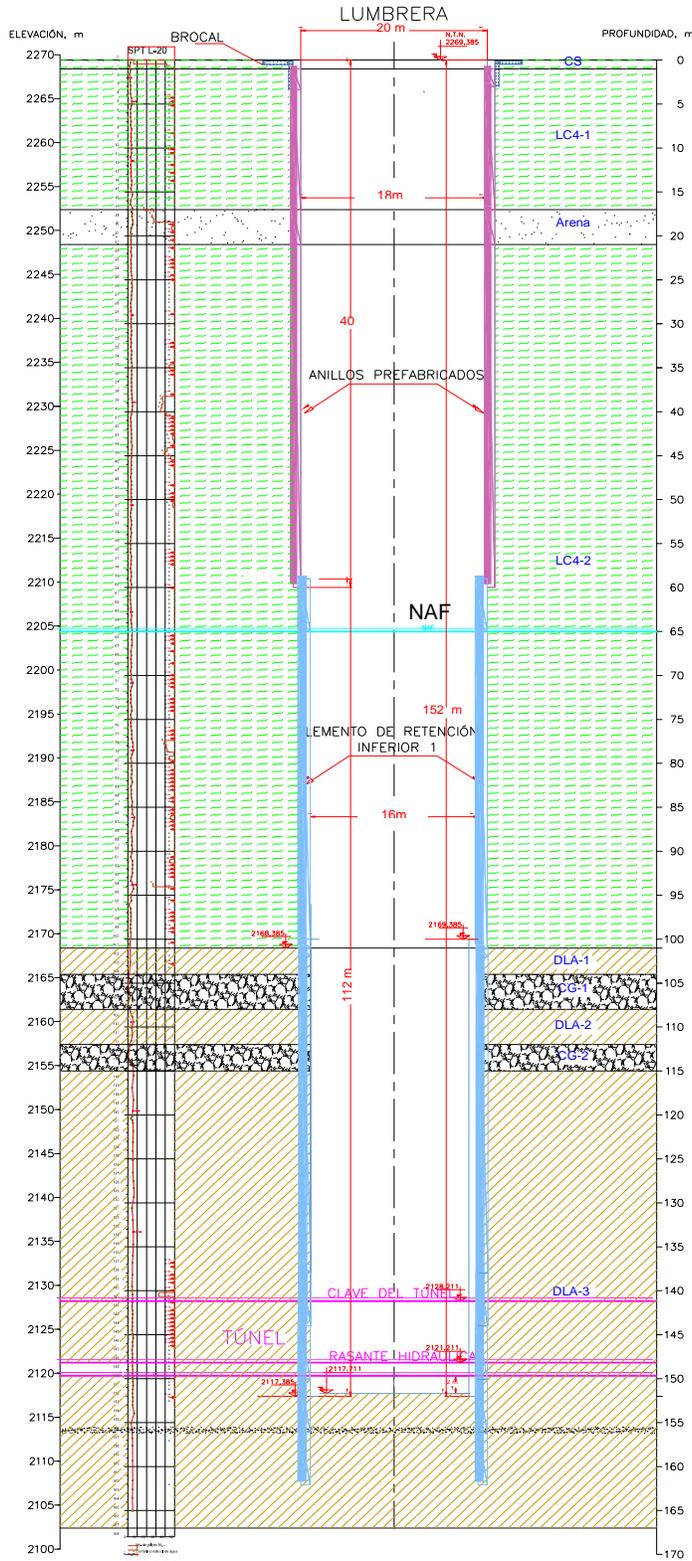


Gráfica 1. Interpretación de resultados de laboratorio de la lumbrera 20.

◆ Prueba UC ■ Prueba TXUU



Modelo geotécnico del sitio de la L20



Profundidad (m)	Unidad estratigráfica	SUCS	N _{prom}	
			de	a
0	1	CS	CH Arcilla de alta plasticidad	23
1	17	UG-1A	MH Limo de alta plasticidad	>50
17	21	ARENA	SM Arena limosa	24
21	101	UG-1B	MH Limo de alta plasticidad	>50
101	104	UG-2A	CH Arcilla de alta plasticidad	>50
104	108	CG-1	GM-SM Grava limosa y Arena limosa	>50
108	112	UG-2A	CH Arcilla de alta plasticidad	>50
112	115	CG-2	GM-SM Grava limosa y Arena limosa	>50
115	167	UG-2C	CH Arcilla de alta plasticidad	>50

NAF = 65m de profundidad

Figura 6. Esquema del Modelo Geotécnico de la Lumbreira 20.

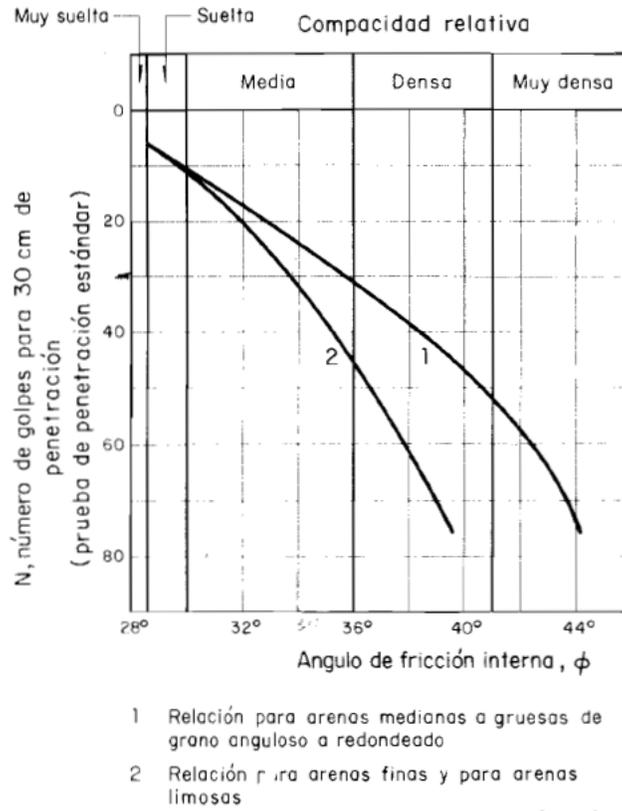
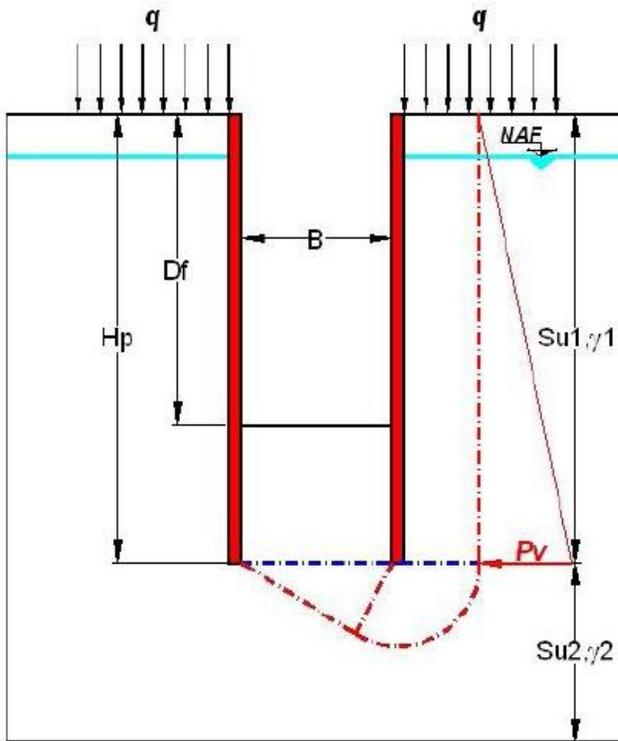


Figura 7. Correlación entre N, ángulo ϕ y compacidad relativa (Terzaghi and Peck, 1968) Manual de Cimentaciones Profundas, SMIG, 2001).

Revisión Geotécnica de falla de fondo

Tabla 5. Factores de seguridad de falla de fondo en toda la profundidad de la lumbrera

Prof.	Fuerzas resistentes							Fuerzas actuantes				FS
	S_u (kPa)	N_c	F_r	γ_1 (kN/m ³)	D_f (m)	H_p (m)	$s_u N_c F_r + \gamma_1 (H_p - D_f)$ (kPa)	P_v (kN/m ²)	Σq (kN/m ²)	F_c	$P_v + \Sigma q F_c$ (kPa)	
10	50	9.00	0.7	17	60	10	1164.83	200	15	1.4	221.00	5.27
20	0	9.00	0.7	17	60	20	680.00	350	15	1.4	371.00	1.83
30	150	9.00	0.7	17	60	30	1454.48	500	15	1.4	521.00	2.79
40	150	9.00	0.7	17	60	40	1284.48	700	15	1.4	721.00	1.78
50	150	9.00	0.7	17	60	50	1114.48	850	15	1.4	871.00	1.28
60	150	9.00	0.7	17	60	60	944.48	1000	15	1.4	1021.00	0.93
70	150	9.00	0.7	17	150	70	2304.48	1200	15	1.4	1221.00	1.89
80	150	9.00	0.7	17	150	80	2134.48	1350	15	1.4	1371.00	1.56
90	150	9.00	0.7	17	150	90	1964.48	1500	15	1.4	1521.00	1.29
101	430	9.00	0.7	17	150	100	3557.50	1700	15	1.4	1721.00	2.07
110	600	9.00	0.7	17	150	110	4457.90	1900	15	1.4	1921.00	2.32
120	480	9.00	0.7	17	150	120	3532.32	2050	15	1.4	2071.00	1.71
130	480	9.00	0.7	17	150	130	3362.32	2200	15	1.4	2221.00	1.51
140	480	9.00	0.7	17	150	140	3192.32	2400	15	1.4	2421.00	1.32
150	480	9.00	0.7	17	150	150	3022.32	2600	15	1.4	2621.00	1.15



Mecanismo de falla de fondo

Revisión geotécnica de la subpresión (Excavación completa del núcleo en la zona del ERI-1).

FS a los 152 m de profundidad, profundidad de la losa de fondo la lumbrera 20

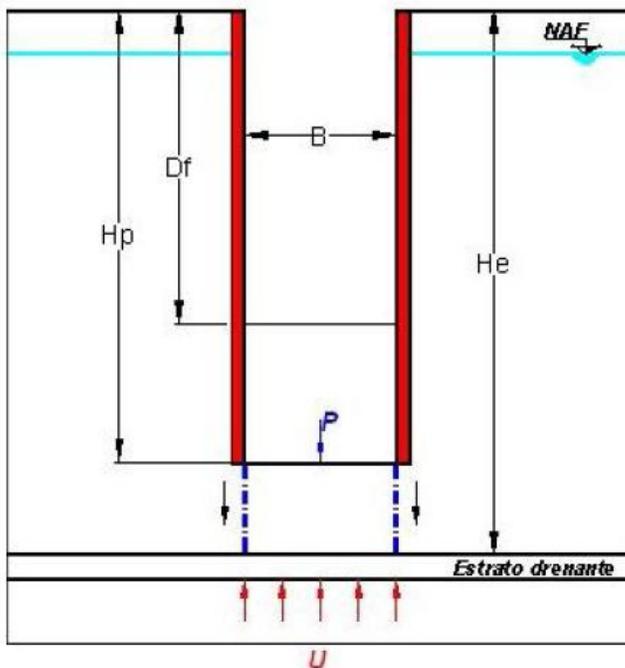
$$FS = \frac{(H - D_f)\gamma_m}{u}$$

Datos

H (m)	D _f (m)	γ _m (kN/m ³)	u (kPa)	FS
156	152	17.5	853.5	0.08

Donde:

- H* Profundidad donde inicia el estrato drenante, en m.
- D_f* Profundidad de la excavación, en m.
- γ_m* Peso volumétrico ponderado del suelo entre el fondo de la excavación al nivel de *D_f* y el estrato drenante, en kN/m³.
- u* Presión de agua medida en piezómetros al nivel de la máxima excavación de la lumbrera, en kPa.



Mecanismo de falla por subpresión



Con la sustitución de los datos en la fórmula anterior, se obtiene un **FS igual a 0.08** menor a **1.5** valor mínimo considerado como seguro para evitar la falla por subpresión al nivel de la losa de fondo de la lumbrera (152 m).

Al no tener un FS adecuado, es necesario determinar un valor **u** el cual sea correcto para evitar la falla de fondo y contar con un FS mínimo de 1.5, por lo tanto en la ecuación anterior se despejará el valor de **u** y el valor del FS se establecerá como de 1.5.

$$u := \frac{(H - D_f) \gamma_m}{FS}$$

Sustituyendo los valores establecidos en el primer cálculo y los del FS, se determino como aceptable una u de 47 kPa.

El valor anterior nos indica que el NAF se debe abatir 5 m por abajo del nivel de la losa de fondo de la lumbrera.

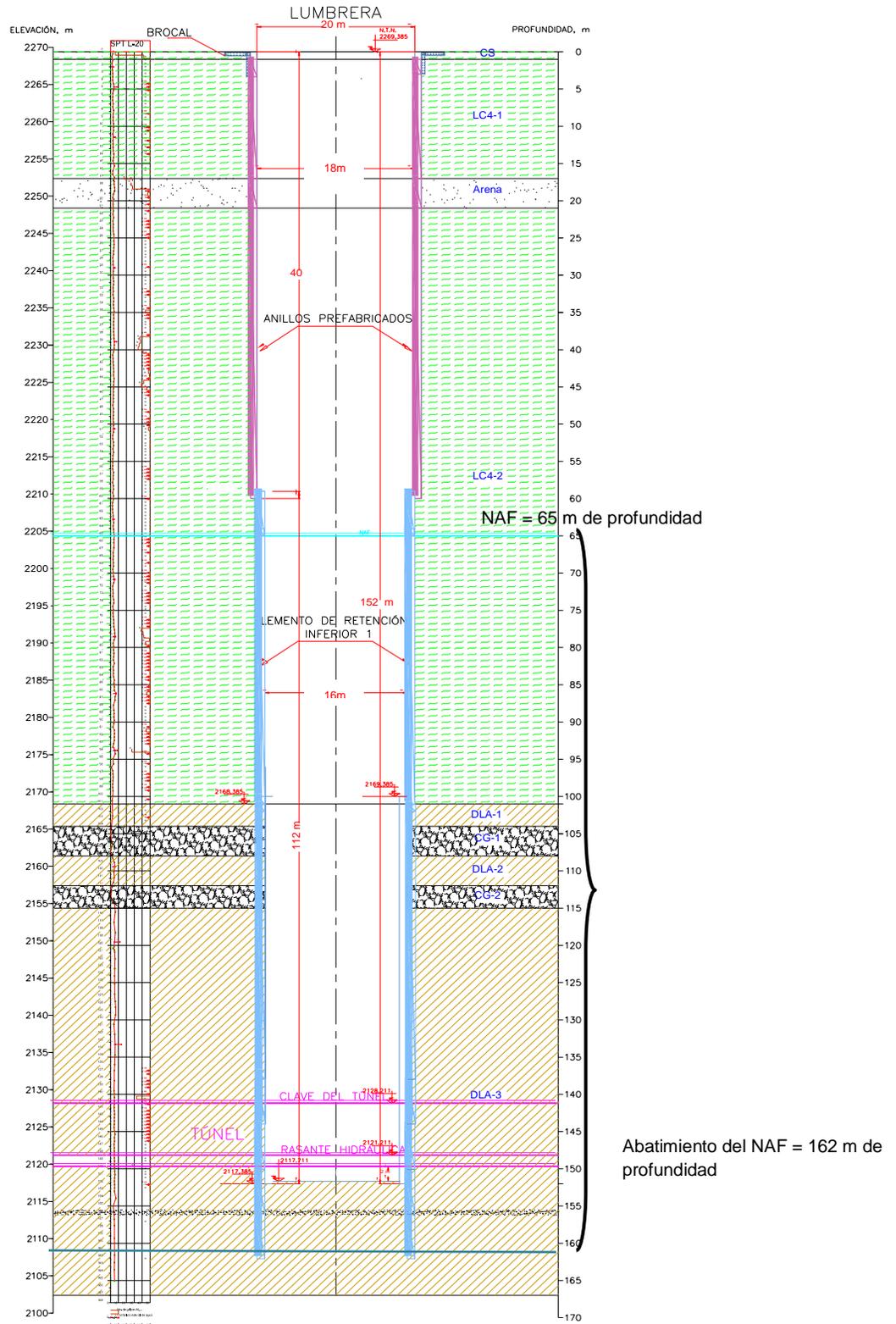


Figura 8. Abatimiento del Nivel de Aguas Freáticas (NAF).



Estabilidad de la zanja anular para la construcción del muro Milán

Tabla 6. Factores de seguridad de la estabilidad de la excavación de la zanja perimetral para pantallas

Prof (m)	s_u (kPa)	L (m)	E_{LB} (kPa)	W (kN)	q B (kPa)	A (°)	$s_u L + (\cos \alpha E_{LB})$ (kPa)	$\text{sen } \alpha (W + q B)$ (kPa)	FS
40	280	160	8400	115920	3450	45	50739.64	84406.53	0.60
50	280	160	13125	115920	3450	45	54080.69	84406.53	0.64
60	280	160	18900	115920	3450	45	58164.19	84406.53	0.69
70	280	160	25725	115920	3450	45	62990.15	84406.53	0.75
80	280	160	33600	115920	3450	45	68558.56	84406.53	0.81
90	280	160	42525	115920	3450	45	74869.43	84406.53	0.89
100	280	160	52500	115920	3450	45	81922.75	84406.53	0.97
110	280	160	63525	115920	3450	45	89718.53	84406.53	1.06
120	280	160	75600	115920	3450	45	98256.76	84406.53	1.16
130	280	160	88725	115920	3450	45	107537.45	84406.53	1.27
140	280	160	102900	115920	3450	45	117560.59	84406.53	1.39
150	280	160	118125	115920	3450	45	128326.19	84406.53	1.52
160	280	160	134400	115920	3450	46	139834.24	84406.53	1.66
170	280	160	151725	115920	3450	47	152084.75	84406.53	1.80

Cálculo del espesor del muro Milán de concreto armado

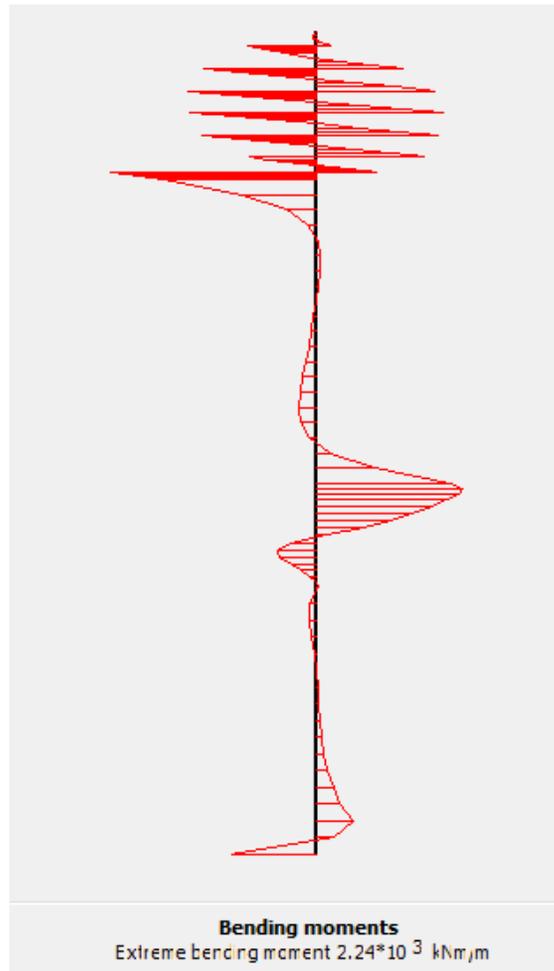


Figura 9. Diagrama de momentos actuantes en muro Milán

Espesor del muro Milán de concreto armado

Datos

F'c=	30000	kPa
fc=	13500	kPa
n=	12	
fs=	137340	kPa
k=	0.5412	
j=	0.8196	
K=	2994	
B=	1	m
M_{max} CL=	2240	kN-m
d=	0.90	m
d(+recubrimientos)=	1.00	m

$$d = \sqrt{\frac{M_{max}}{B \times K}}$$



Estabilidad por flotación de la estructura

Peso de la estructura (W)

Espesor promedio = 0.8 m
Diámetro medio circunferencia = 19 m
Perímetro circunferencia = 59.70 m
Altura de muros de lumbrera = 162 m
Área total muros = 9,669 m²
Volumen muros = 7,735 m³
Peso volumétrico concreto = 22 kN/m³
Peso muros = **170,170 kN**

Peso losa de fondo

Área losa de fondo = 254 m²
Espesor losa fondo = 2 m
Volumen losa fondo = 508 m³
Peso volumétrico concreto = 22 kN/m³
Peso losa de fondo = **11,176 kN**
Peso total lumbrera
W = Peso muros + Peso losa fondo = 170,170 + 11,176 = **181,346 kN**

Fuerza de fricción que se opone a la flotación (F_{fricc})

Área total muros = 9,669 m²
Resistencia al esfuerzo cortante no drenado ponderado (s_u) = 280 kPa
F_{fricc} = Área total muros x s_u = 9,669 x 280 = **2'572,080 kN**

Fuerza de flotación

Nivel del NAF = 65 m
Profundidad del máximo nivel de exvacación = 152 m
Área en planta de la lumbrera = 254 m²
F = Área planta (Profundidad del máximo nivel de exvacación - Nivel del NAF) P_v agua
F = 254 (152-65) 9.81 = **216,781 kN**

$$FS = (W (F_{cf}) + F_{fricc}(F_R) / F = (181,346 (0.9) + 2'572,080 (0.6)) / 216,781 = 7.90$$

Donde

F_{cf} Factor de carga para análisis donde el peso sea favorable a la estabilidad
F_R Factor de reducción especificado en el incisos 5.1 RCDF-NTC-DCC



BIBLIOGRAFÍA

Artículos

Aguilar-Téllez, Rangel-Núñez, Mooser Hawtree, Jornada Técnica Túneles en México, Geotecnia del Túnel Emisor Oriente, Barcelona, Junio 2011.

Auvinet, Zemva, 2do Simposio Internacional sobre túneles y lumbreras en suelos y roca, Construcción de lumbreras con anillos prefabricados en arcillas blandas del Valle de México, México 2012.

Auvinet, Rodríguez, Análisis, Diseño, Construcción y Comportamiento de Obras Subterráneas en Suelos, IIUNAM, 2010.

De la Peña, Hernández, Robles, 2^{do} Simposio Internacional sobre túneles y lumbreras en suelos y roca, Diseño geotécnico de la lumbrera 04 del Túnel Emisor Oriente, México 2012

Cuevas, Arenas, Cuevas, XXV Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica, Sistemas de anclaje, Acapulco Guerrero, 2010

Moreno Fernández A., Lumbreras y Túneles en suelos, Trabajo de ingreso a la academia de ingeniería, México, 1991.

Informes geotécnicos

CFE, México, 2009, Estudio de factibilidad técnica e ingeniería básica para la elaboración del proyecto ejecutivo y la construcción del Túnel Emisor Oriente, ubicado en el Distrito Federal y los estados de México e Hidalgo. Integración de la información geotécnica a nivel de ingeniería básica para el proyecto de la lumbrera L20, Túnel Emisor Oriente.

CFE, México 2009, Estudio de Factibilidad Técnica e Ingeniería Básica para la Elaboración del Proyecto Ejecutivo y la Construcción del Túnel Emisor Oriente, ubicado en el Distrito Federal y los estados de México e Hidalgo.

CONAGUA, Manifestación de Impacto Ambiental, modalidad particular, para la obra que da cumplimiento a lo dispuesto en la condicionante número dos del resolutivo de la manifestación de impacto ambiental (MIA), modalidad particular, correspondiente al proyecto denominado: "Proyecto



para la Construcción del Túnel Emisor Oriente, para incrementar la capacidad de desalojo de las aguas residuales y pluviales del Valle de México, y disminuir los riesgos de inundación a la población asentada en la zona” ,elaborado por Planeación y Proyectos de Ingeniería, S.C, 2010.

Libros

CFE, Manual de Diseño de Obras Civiles, Diseño por Sismo, 2008

CFE, Manual de diseño de obras civiles, México, 1978.

CNA, Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento, Geotecnia en construcción especializada, México, Diciembre 2007.

Departamento del Distrito Federal, Memoria técnica de las obras del drenaje profunda del Distrito Federal, 1970

Enrique Santoyo, XXV Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica, Decimotercera Conferencia Nabor Carrillo, Exploración y muestreo de suelos, Acapulco Guerrero, 2010.

Gonzáles de Vallejo Luis, Ingeniería Geológica, 2004

J.Bowles, Foundation analyses and desing, USA 2002

J. M. Duncan,S.G. Wring, Soil strenght and slope stability, USA,2005

National Highway Institute, Soil and Foundation, Vol I, 2006

Rico, Del Castillo, La ingeniería de suelos en las vías terrestres, 1999

Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, Manual de Construcción de Cimentaciones Profundas, 2001

Páginas web

www.conagua.gob.mx

<http://e-local.gob.mx/work/templates/enciclo/EMM15mexico/municipios/15035a.html>

<http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/espanol/datosgeogra/basicos/fisiografia/provincias.gif>

<http://mapserver.inegi.org.mx/geografia/espanol/estados/hgo/geolo.cfm?c=444&e=23>



http://portalisp.sgm.gob.mx/cartas_impresas/productos/cartas/estados/geologia/pdf/df_mex_morelos.pdf

www.ssn.unam.mx

www.wikipedia.com

Programas de cómputo

PLAXIS V8.2, Delft University of Technology

Publicaciones

Gobierno del Distrito Federal (GDF), Reglamento de Construcciones del Distrito Federal (RCDF), Normas Técnicas Complementarias para el Diseño de Cimentaciones, México D.F., 2001

Tesis

Gutiérrez Morgado Pablo, Análisis y Diseño del Revestimiento de un Túnel en Suelos del Valle de México, Tesis Profesional para obtener el grado de Ingeniero Civil , UAM Azcapotzalco, México DF, 2009