



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MÉXICO
PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES EN INGENIERÍA

**“Revisión de la estabilidad de una lumbrera en la zona del
lago del Valle de México”**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

ESPECIALISTA EN GEOTÉCNIA

PRESENTA:

MARTÍN RAMÍREZ DÍAZ

TUTOR

DR. RAÚL AGUILAR BECERRIL

MÉXICO D.F., MAYO DE 2013

*A la memoria de mi hermana **Isabel***

AGRADECIMIENTOS

A mis padres

Por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien, por ser el pilar fundamental en todo lo que soy, en toda mi educación, tanto académica como de la vida, por su apoyo incondicional.

A mis hermanas

*A **Isabel** (Q.D.E.P.) y **Lupita**, partes fundamentales en mi vida, por apoyarme y animarme en todo momento, por el consejo sabio y oportuno, por ser un ejemplo a seguir, por quererme siempre.*

*A mis hijos **Martín y Huget** por quienes cada día tiene sentido, los testigos silenciosos de mis luchas cotidianas en busca de un mejor futuro, a ellos, mi esperanza, mi alegría, mi vida y la culminación de este trabajo y lo que representa.*

*A mi esposa **Gabriela** quien ha estado a mi lado compartiendo mis alegrías y angustias, por el estímulo que me supere día con día, por su apoyo incondicional, por ser una compañera inseparable. Gracias por tu amor, paciencia y comprensión.*

Martín Ramírez Díaz

CONTENIDO

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 1. | INTRODUCCIÓN | 1 |
| | 1.1 Antecedentes | 4 |
| | 1.2 Objetivo | 5 |
| | 1.3 Alcances | 5 |
| 2. | CONDICIONES GEOTÉCNICAS | 7 |
| | 2.1 Marco Geológico general | 7 |
| | 2.1.1 La cuenca | 7 |
| | 2.1.2 Esquemas y secciones geológicas geológicas | 7 |
| | 2.1.3 Estratigrafía del relleno cuaternario. | 7 |
| | 2.1.4 Esquema climático | 9 |
| | 2.2 Información geotécnica disponible | 13 |
| | 2.3 Modelo Geotécnico de diseño | 14 |
| | 2.3.1 Trabajos de campo | 14 |
| | 2.3.2 Interpretación estratigráfica. | 14 |
| | 2.3.3 Pruebas de laboratorio | 16 |
| | 2.3.4 Modelo geotécnico de diseño | 19 |
| | 2.4 Esfuerzos geoestáticos e hidráulicos | 19 |
| 3. | ANÁLISIS Y DISEÑO GEOTÉCNICO DE LA LUMBRERA | 20 |
| | 3.1 Características geométricas y materiales | 20 |
| | 3.2 Empujes | 22 |
| | 3.3 Falla general del fondo | 25 |
| | 3.4 Falla por pateo | 26 |
| | 3.5 Falla por flotación | 29 |
| | 3.6 Falla por subpresión | 30 |
| | 3.6.1 Diseño de pozos de bombeo | 32 |
| | 3.7 Fricción negativa | 36 |
| | 3.8 Estabilidad de la excavación para muro Milán | 36 |
| | 3.9 Análisis a la salida del escudo | 40 |
| | 3.9.1 Criterio de Tamez | 40 |
| | 3.10 Comportamiento ante descarga permanente | 42 |
| | 3.10.1 Distribución de esfuerzos | 42 |
| | 3.10.2 Análisis de movimientos verticales | 44 |
| | 3.11 Análisis sísmico | 46 |
| | 3.11.1 Método riguroso | 46 |
| | 3.11.2 Método simplificado | 47 |
| | 3.12 Análisis esfuerzo-deformación con MEF | 55 |
| | 3.12.1 Condiciones iniciales | 57 |
| | 3.12.2 Etapas constructivas. | 58 |
| | 3.12.3 Resultados obtenidos | 58 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 4. | PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO GENERAL | 69 |
| 4.1 | Abatimiento del nivel freático | 69 |
| 4.2 | Construcción de la plataforma de trabajo. | 69 |
| 4.3 | Construcción del brocal temporal. | 69 |
| 4.4 | Muro Milán | 69 |
| 4.5 | Construcción del brocal definitivo | 77 |
| 4.6 | Instrumentación | 78 |
| 4.7 | Excavación del núcleo central | 80 |
| | 4.7.1 Apuntalamiento | 80 |
| 4.8 | Construcción de la losa de fondo | 81 |
| 4.9 | Anclaje de la losa de fondo con el muro Milán | 81 |
| 5. | CONCLUSIONES | 82 |
| 6. | REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA | 83 |

ANEXO 1 SONDEO DE EXPLORACIÓN

ANEXO 2 PRUEBAS DE LABORATORIO

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Resultados de ensayos de consolidación

Tabla 2. Resultados de ensayos triaxiales UU

Tabla 3. Modelo geotécnico de diseño

Tabla 4. Estación piezométrica

Tabla 5. Cálculo de esfuerzos verticales

Tabla 6. Cálculo de la presión activa y presión redistribuida de diseño, y presión de diseño para el revestimiento definitivo

Tabla 7. Falla general del fondo

Tabla 8. Falla por pateo del muro Milán

Tabla 9. Información para bombeo

Tabla 10. Permeabilidad del modelo geotécnico

Tabla 11. Estabilidad de la zanja con lodo bentonítico

Tabla 12. Estabilidad de la zanja con concreto fresco

Tabla 13. Presión neta

Tabla 14. Parámetros de los sistemas investigados

Tabla 15. Valores sugeridos de N_{kh}

Tabla 16. Valores de las constantes

Tabla 17. Resultados de la velocidad cortante y la densidad promedio

Tabla 18. Resultados obtenidos de velocidad de corte S , densidad ... promedio y periodo dominante T_s

Tabla 19. Parámetros geotécnicos del modelo para Plaxis

Tabla 20. Parámetros de los elementos placa para el modelo Plaxis

Tabla 21 Factores de seguridad contra la falla de la excavación al final de la excavación

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Construcción de lumbrera flotada

Figura 2. Lumbrera de anillos

Figura 3. Lumbrera con muro Milán

Figura 4. Lumbrera con pilas secantes

Figura 5. Ubicación de la lumbrera de análisis

Figura 6. Elementos morfológicos más importantes de la Cuenca

Figura 7. Secciones geológicas de la Cuenca

Figura 8. Geología y morfología tridimensional de la cuenca

Figura 9. Secuencias pleistocénicas debajo de la Ciudad

Figura 10. Eventos geológicos ambientales durante el Holoceno y Pleistoceno

Figura 11. Zonificación geotécnica de la Ciudad de México

Figura 12. Sondeo de cono eléctrico

Figura 13 Modelo Geotécnico de diseño

Figura 14. Presiones de diseño para el revestimiento primario

Figura 15. Presiones de diseño para el revestimiento definitivo

Figura 16. Mecanismo de Terzagui-Prandtl para la falla de fondo

Figura 17. Falla general del fondo de la excavación

Figura 18. Falla por pateo

Figura 19. Mecanismo de falla por pateo del muro

Figura 20. Mecanismo de falla por flotación

- Figura 21. Mecanismo de falla por subpresión
- Figura 22. Características de un pozo con puntas eyectoras
- Figura 23. Esquema de pozo de bombeo profundo
- Figura 24. Curva de abatimiento
- Figura 25. Arreglo de los pozos de bombeo
- Figura 26. Presiones y esfuerzos inducidos en la zanja por el lodo bentonítico
- Figura 27. Presiones y esfuerzos inducidos en la zanja por el concreto fluido
- Figura 28. Mecanismo simplificado de falla de frente de un túnel
- Figura 29. Distribución de esfuerzos en un área circular dentro de la masa de suelo
- Figura 30. Distribución de esfuerzos verticales, Nishida (1966)
- Figura 31. Convención de signos de movimientos verticales
- Figura 32. Dominio de análisis
- Figura 33. Sistema suelo-lumbrera para análisis de interacción dinámica, modelo geotécnico de dos capas
- Figura 34. Espectros de peligro uniforme en roca para el Valle de México
- Figura 35. Velocidad de onda de corte
- Figura 36. Coeficientes de respuesta para el cortante y momentos estáticos
- Figura 37. Cortante y momento dinámicos para la condición temporal
- Figura 38. Cortante y momentos dinámicos para la condición definitiva
- Figura 39. Modelo geomecánico axisimétrico para el análisis de elemento finito
- Figura 40. Malla de elementos finitos al inicio (izquierda) y a los 5 m de excavación (derecha)
- Figura 41. Malla de elementos finitos a los 10 m (izquierda) y a los 15 m de excavación (derecha)
- Figura 42. Malla de elementos finitos a los 20 m (izquierda) y a los 25 m de excavación (derecha)
- Figura 43. Malla de elementos finitos a los 30 m (izquierda) y a los 35 m de excavación (derecha)
- Figura 44. Desplazamientos excavación a 5m, $u_{\max}=20.0\text{cm}$ (izquierda) y 10m, $u_{\max}=32.0\text{cm}$ (derecha)
- Figura 45. Desplazamientos excavación a 15m, $u_{\max}=42.0\text{cm}$ (izquierda) y 20m, $u_{\max}=47.6\text{cm}$ (derecha)
- Figura 46. Desplazamientos excavación a 25m, $u_{\max}=54.1\text{cm}$ (izquierda) y 30m, $u_{\max}=62.3\text{cm}$ (derecha)
- Figura 47. Desplazamientos excavación a 35m, $u_{\max}=69.2\text{cm}$ (izquierda) y construcción de losa de fondo, $u_{\max}=16.6\text{cm}$ (derecha)

Figura 48. Incremento de fuerza cortante (izquierda) y puntos de plastificación (derecha) a la profundidad máxima de excavación (35m)

Figura 49. Detalle del brocal

Figura 50. Secuencia de excavación de tableros

Figura 51. Junta de muro Milán

Figura 52. Limpieza del fondo de la zanja

Figura 53. Manejo de armados

Figura 54. Orejas de fijación del acero de refuerzo

Figura 55. Centrales

Figura 56. Detalle de colado

Figura 57. Extracción de la junta de colado

Figura 58. Brocal definitivo

Figura 59. Instrumentación requerida para la lumbrera

Figura 60. Diagrama de cuerpo libre de un segmento circular de muro

Figura 61. Conexión losa - muro

1. INTRODUCCIÓN

Las lumbreras son excavaciones verticales por las cuales se puede tener acceso a instalaciones o estructuras subterráneas como túneles. Construidas bajo muy diferentes técnicas, estos pozos verticales tienen un diámetro mayor al del túnel que intersecan y permiten bajar el equipo de excavación, realizar operaciones durante la construcción como la evacuación del material de rezaga y, durante su operación, sirven para darle mantenimiento al túnel.

Clasificación de lumbreras de acuerdo a su función específica:

- a) *Lumbreras de ensamble*: se denominan así a las lumbreras donde se baja el equipo para la excavación del túnel independientemente del procedimiento constructivo empleado. Pueden ser varias las lumbreras de ensamble dependiendo la magnitud del proyecto. Por ejemplo, si la excavación del túnel se realiza por medio de diferentes frentes de excavación y cada uno de estos frentes posee un escudo, las lumbreras de ensamble serán aquellas a donde lleguen los diversos componentes del escudo para que, abajo, vía la lumbrera, se lleve a cabo el montaje del escudo. Estas lumbreras poseen por lo general dimensiones mayores a las de las lumbreras de servicio.
- b) *Lumbreras de servicio*: son aquellas lumbreras que funcionan para la salida de rezaga del frente de excavación, la entrada y salida de herramienta y personal.

Clasificación de las lumbreras con base en el procedimiento constructivo.

- a) *Lumbrera flotada*: esta técnica ha sido una de las más usadas en la zona lacustre del Valle de México surgida en los años 60. Consiste en construir un brocal circular, excavando por paneles una zanja circular, dejando un núcleo central de suelo sin excavar. Posteriormente se excava el núcleo estabilizando la excavación con lodo. A continuación se instala un tanque circular flotante sobre el lodo y se construye la estructura de la lumbrera sobre este tanque que se va sumergiendo en el lodo conforme se construye la lumbrera encima de él. Así, paulatinamente, se sumerge la estructura hasta alcanzar su posición final de diseño. El espacio anular vacío entre la lumbrera y el suelo se rellena con mortero (Figura 1).
- b) *Lumbreras con anillos*: el método de anillos de concreto reforzado nace como una alternativa al procedimiento de flotación. El primer paso de su procedimiento constructivo consiste en construir brocales de concreto reforzado, uno interior y otro exterior, para guiar a la almeja que realiza una excavación perimetral en secuencia alternada, misma que se estabiliza con lodo bentonítico. La excavación del núcleo se realiza empleando una almeja de otro tipo y de mayor capacidad que la guiada, sustituyendo de nueva cuenta el suelo por lodo bentonítico. Los anillos de concreto reforzado son muy esbeltos, generalmente de 0.15 m de espesor y hasta 3.0 m de altura, por lo que su manejo se hace delicado. Cuando el núcleo esté totalmente excavado (y consecuentemente inundado de lodo bentonítico) los anillos ya deberán estar contruidos. El primer anillo que se baja a la lumbrera deberá tener vigas radiales que a su vez funcionarán como acero de refuerzo de la losa de fondo. También en ese

primer anillo se sueldan vigas verticales de sección rectangular hueca en el perímetro para que funjan como guías para los siguientes anillos por bajar. Después de bajar 2 ó 3 anillos (mismos que deberán estar suspendidos respecto del fondo de la excavación) se cuela la losa de fondo, sobre la cual, teóricamente, descansan los anillos de concreto. Después de que la losa de fondo alcance una cierta resistencia, se baja la totalidad de los anillos y se hace un relleno anular entre los anillos y el suelo perimetral a base de mortero y bentonita. Se debe esperar a que el relleno perimetral tenga una cierta resistencia para evacuar el lodo bentonítico que inunda el núcleo. Finalmente y después de limpiar las paredes de la lumbrera, se construye el revestimiento definitivo que consiste en otra losa de fondo y muros perimetrales de concreto reforzado utilizando cimbra deslizante (Figura 2).



Figura 1. Construcción de lumbrera flotada

- c) *Lumbrera con muro milán*: los muros Milán en la construcción de lumbreras juegan un papel de tablestacado perimetral que permite, mediante una correcta ejecución de su construcción, un soporte anular (a pesar que los muros sean planos) que contenga adecuadamente los esfuerzos circunferenciales del terreno. Se comienza con la construcción de brocales en superficie que servirán de guías para la excavación de los tableros de muro Milán; posteriormente con la ayuda de una almeja o en su caso una hidrofresa (dependiendo si el suelo es blando o duro, respectivamente) comienza la excavación de los tableros estabilizando con lodo bentonítico para que una vez llegando al nivel máximo de excavación se introduzca el acero de refuerzo y se haga el colado con la ayuda de tubo *tremie*. La excavación de los tableros en todo el perímetro de la lumbrera debe ser de manera alternada y conservando en todo momento la verticalidad. Posterior a la construcción de los muros, se inicia la construcción de la trabe circular de coronamiento que está a nivel de superficie y cuya función será unir estructuralmente todos los muros Milán, previo descabece de éstos. Una vez que se construye la trabe de coronamiento se procede a excavar el núcleo central de suelo por medios mecánicos hasta llegar a una cota fijada en proyecto donde se construye otra trabe circular (llamada ahora anillo de rigidez) que ayudará, como su nombre lo indica, a rigidizar la

zona baja de la lumbrera cuando se abra paso para la tuneladora. Finalmente, se construye la losa de fondo (Figura 3).

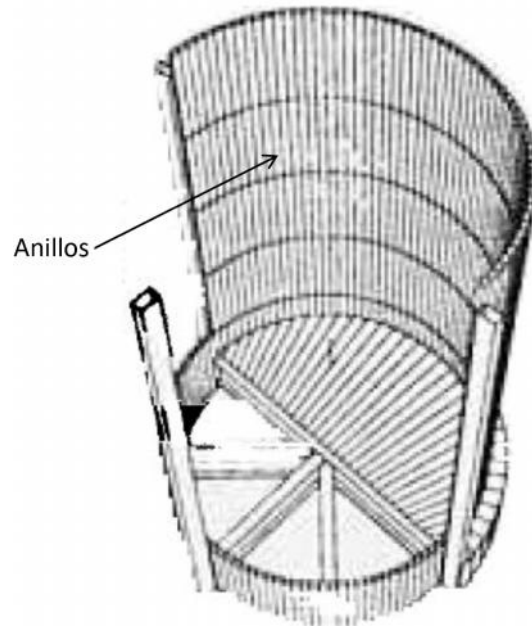


Figura 2. Lumbrera de anillos



Figura 3. Lumbrera con muro Milán

- d) *Lumbrera con pilas secantes*: consiste en realizar desde superficie perforaciones continuas en forma intercalada, hasta lograr formar una batería de pilas secantes capaces de simular un muro largo de concreto, esto se realiza en paralelo con la sección o estructura que se pretende construir para posteriormente excavar el núcleo e ir colocando los elementos estructurales de apoyo como traveses y bardas de liga.



Figura 4. Lumbrera con pilas secantes

Elección del tipo de lumbrera a analizar.

Se escogió analizar la lumbrera con muro Milán debido a que la lumbrera flotada y con anillos tiene riesgo de la inestabilidad del fondo y paredes de la excavación, obstrucción al descenso del tanque e inestabilidad general. Por otro lado, el muro Milán existe antes de la excavación y funciona como elemento estructural y definitivo.

1.1 Antecedentes

La construcción de lumbreras en la Ciudad de México ha sido basta y diversa en los últimos 40 años. Se han construidos estructuras de este tipo con diámetros y profundidades variadas, en terrenos muy difíciles como en los arcillosos del lago virgen, o en resistentes como las tobas del poniente de la ciudad, debajo o arriba del nivel freático, en lugares aislados o poblados en donde la generación de movimientos superficiales podrían haber ocasionado accidentes.

En algunos casos las condiciones de terreno conllevan a un riesgo alto, como lo han sido las lumbreras construidas en las arcillas de la zona del lago virgen, donde la resistencia al esfuerzo cortante y el módulo de deformación del suelo, son bajos y aún con efectos ligeros de artesianismo en los estratos permeables. Estas condiciones del subsuelo han obligado a la ingeniería mexicana a adecuar, pero en la mayoría de los casos a desarrollar, las técnicas de análisis y los procesos constructivos.

En la presente tesis se hará énfasis en las propuestas generadas principalmente en el aspecto de diseño aunque tomando como base el proceso constructivo de lumbrera con muros colados en el lugar (muro **Milán**), se utiliza el Método de Equilibrio Límite para analizar los diferente meca-

nismos de falla que se pueden presentar. Sin embargo, es común en la actualidad llevar a cabo el análisis del problema con métodos numéricos como el Método de Elementos Finitos (*MEF*), con lo cual se logra una aproximación mayor al modelado del problema, involucrando la secuencia constructiva, la presencia de heterogeneidades y diferentes condiciones de carga, pero principalmente la evaluación de estado de deformaciones o desplazamientos inducidos, siendo así posible verificar las condiciones de servicio de la lumbrera.

La excavación convencional de cárcamos profundos en suelos arcillosos blandos es un proceso complejo y peligroso, que está expuesto al de inestabilidades en las paredes y el fondo de la excavación.

La incertidumbre que se presenta en los mecanismos de falla obliga a conocer la necesidad de la precisión en la información geotécnica en la que se basa el diseño, que va de la mano de la técnica de exploración adecuada para suelos blandos. La técnica del cono eléctrico ha demostrado estar menos expuesta a errores humanos y ser capaz de detectar todos los pequeños detalles estratigráficos de un sitio. Asimismo, es necesario conocer la distribución de la presión de poro con la profundidad y su variación con el proceso constructivo.

El lugar donde se ubica la lumbrera analizada se muestra en la Figura 5, se localiza dentro de la Zona Federal del Lago de Texcoco, al norte colinda con el El Caracol Sosa Texcoco, al sur con el lago Nabor Carrillo, al este con San Salvador Atenco y al Oeste con el Río de los remedios.

1.2 Objetivo

Se analizará la estabilidad de una lumbrera con base en el procedimiento constructivo con muro **Milán** ante los distintos posibles mecanismos de falla.

1.3 Alcances

Los alcances son los siguientes:

- a) Se construirá el Modelo Geotécnico de análisis de la lumbrera.
- b) Se definirán las condiciones hidráulicas del sitio.
- c) Se determinarán los esfuerzos geostáticos del sitio.
- d) Se realizará el diseño geotécnico de la lumbrera con muro **Milán** con los siguientes análisis: estabilidad de la zanja con lodo y con concreto, empotramiento de la pata del muro milán, falla general del fondo, empujes laterales, flotación, subpresión, fricción negativa, análisis esfuerzo-deformación con *MEF*, comportamiento ante descarga permanente, análisis sísmico. Finalmente, se describirá el procedimiento general de construcción.



Figura 5. Ubicación de la lumbrera de análisis

2. CONDICIONES GEOTÉCNICAS

2.1 Marco Geológico general

2.1.1 La cuenca

El subsuelo de la cuenca se puede describir como un complejo cúmulo de sucesivas formaciones volcánicas que alcanzan más de 2,000 m de espesor, el cual descansa sobre un basamento de rocas sedimentarias marinas. En la Figura 6 se definen los elementos morfológicos más importantes de la cuenca que se cerró en el Cuaternario Superior, al formarse la Sierra Chichihuatzin, hace unos 600,000 años (Referencia 1).

2.1.2 Esquemas y secciones geológicas geológicas

La Figura 7 muestra una sección desde el Mezquital hasta el Tepozteco, a lo largo de 150 km; en el norte domina la tectónica del Arco Tarascom, en el sur la del Arco Chichihuatzin, caracterizada esta última por los hundimientos más pronunciados. Una “alto” que separa ambos arcos está dado por la sierra de Guadalupe, que probablemente forma, junto con la Sierra de Patlachique, el resto del arco volcánico antiguo, mio-plioceno. Al sur de la sección el basamento prevolcánico de sedimento marinos plegados muestra la separación de los elementos laramídicos y oaxaqueños.

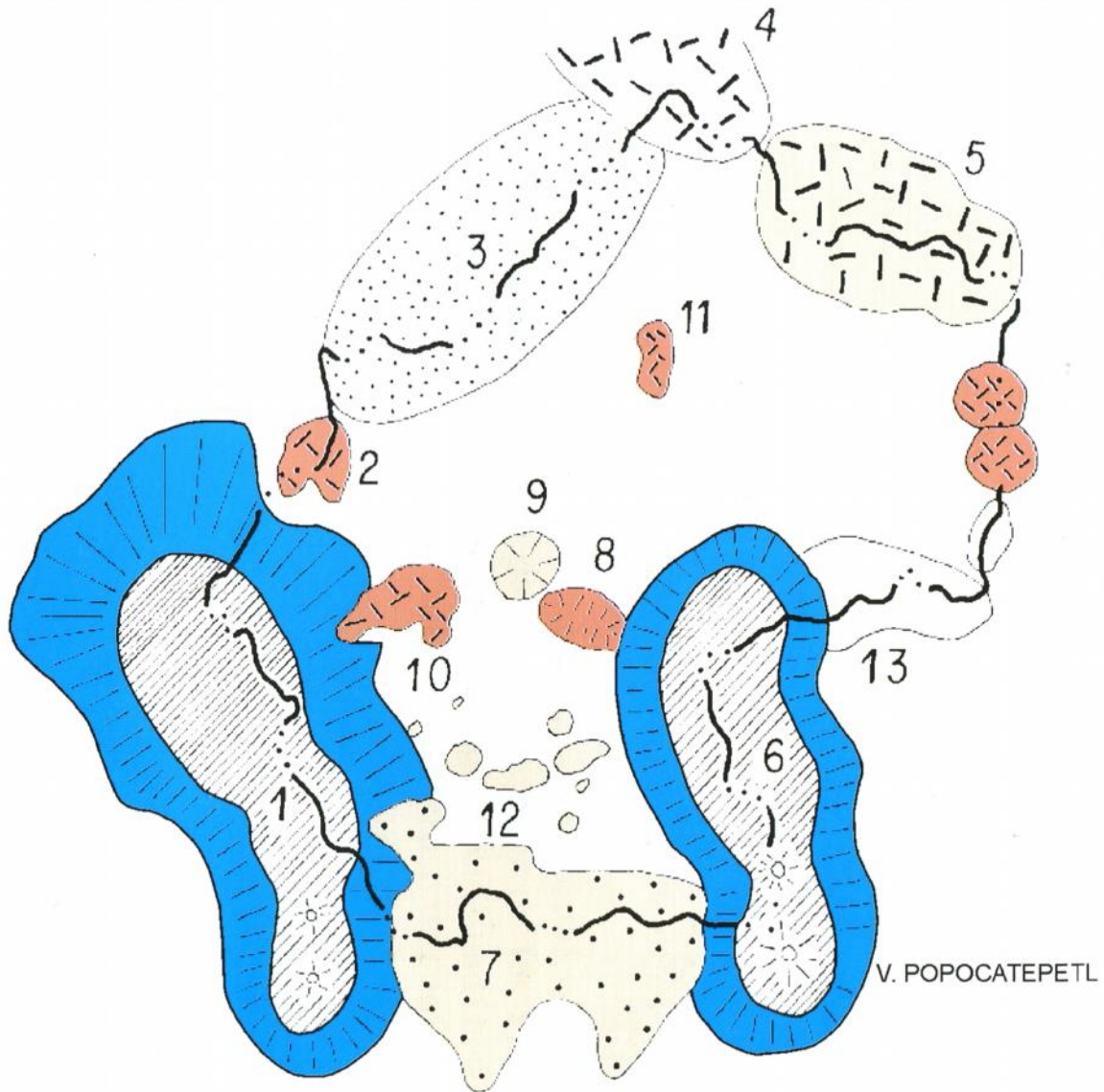
En la Figura 8 se muestra de manera tridimensional la cuenca (Referencia 1), abarca desde el Chichihuatzin hasta Pachuca, desde las Sierra de las cruces hasta la Sierra Nevada. Aparecen en ella los Arcos Tarasco y Chichihuatzin y dos de los colapsos del Cerro de San Miguel. También se indica un corte a lo largo de la Sierra del Chichihuatzin y también se muestra la fosa Roma.

2.1.3 Estratigrafía del relleno cuaternario.

La cuenca de México asemeja una enorme presa azolvada: la cortina situada al sur está representada por los basaltos de la Sierra de Chichihuatzin, mientras que los rellenos del vaso están constituidos en su parte superior por las arcillas lacustres y en su parte inferior por los clásticos derivados de la acción de los ríos, arroyos, glaciares y volcanes (Referencia 2).

El conjunto de rellenos contiene además capas de cenizas y estratos de pómez producto de las erupciones volcánicas menores y mayores durante el último medio millón de años, en el Pleistoceno Superior. También se reconocen en el citado relleno numerosos suelos, producto de la meteorización de los depósitos volcánicos, fluviales, aluviales y glaciares (estos suelos transformados en paleosuelos o tobas).

La Figura 9 muestra una sección de la secuencia estratigráfica para las arcillas y relleno aluvial debajo de la ciudad de México. Esta secuencia son: a) arcillas superiores, b) Capa Dura, c) Arcillas Inferiores Consolidadas y d) Depósitos Profundos.



- | | |
|-----------------------------------|-----------------------------|
| 1 Sierra de las Cruces-Monte Alto | 8 Sierra Patlachique |
| 2 Sierra Tepoztlán | 9 Cerro Chiconautla |
| 3 Sierra Tezontlalpan | 10 Sierra Guadalupe |
| 4 Sierra de Pachuca | 11 Sierra de las Pitayas |
| 5 Sierra de Singuilucan | 12 Sierra de Santa Catarina |
| 6 Sierra Nevada-Río Frío | 13 Sierra Calpulalpan |
| 7 Sierra Chichinautzin | |

Figura 6. Elementos morfológicos más importantes de la Cuenca

2.1.4 Esquema climático

El clima uniformemente cálido y a menudo desértico del Plioceno, en las latitudes de la Meseta Central Mexicana, cedió a climas cambiantes y extremos del Pleistoceno.

Comenzó el cambio con ligeras oscilaciones de periodos calurosos a fríos los que se fueron acentuando hasta hace un millón de años cuando se inicio la primera gran glaciación, la *Nebraska*, con una duración aproximada de 100, 000 años (Referencia 2).

Siguió un lapso caluroso, el cuál cedió a un segundo periodo de glaciación prolongada, la *Kansas*. Entonces se produjo un lapso extenso de clima caliente de unos 200, 000 años, este intervalo se denomina en Norteamérica el *Yarmouth* o el *Gran Interglacial*, prevaleció hace 400, 000 a 600, 000 años en todo el orbe.

Siguió un tercer periodo glacial, el *Illinois*, para el cual se han podido determinar dos avances separados por un periodo con clima moderado. Esta tercera glaciación terminó al desarrollarse de nuevo un clima relativamente cálido a lo largo de 80,000 y 100, 000 años, se le conoce como el *Tercer Interglacial* o *Sangamon* en Norteamérica. De nuevo se fue enfriando el clima, imponiéndose la cuarta glaciación, la *Wisconsin*, caracterizada por tres oscilaciones y dos estadiales de clima moderado, terminó hace 100,000 años aproximadamente. Es entonces que comenzó el *Holoceno* o *Reciente*, periodo climático actual.

En resumen, la cuenca de México, desde su cierre en el sur por los basaltos de la Sierra Chichinautzin, ha pasado por cuatro periodos de glaciación, la *Nebraska*, la *Kansas*, el *Illinois* y el *Wisconsin* y dos interglaciales, el *Yarmouth* y el *Sangamon*, tal como se indica en la Figura 10.

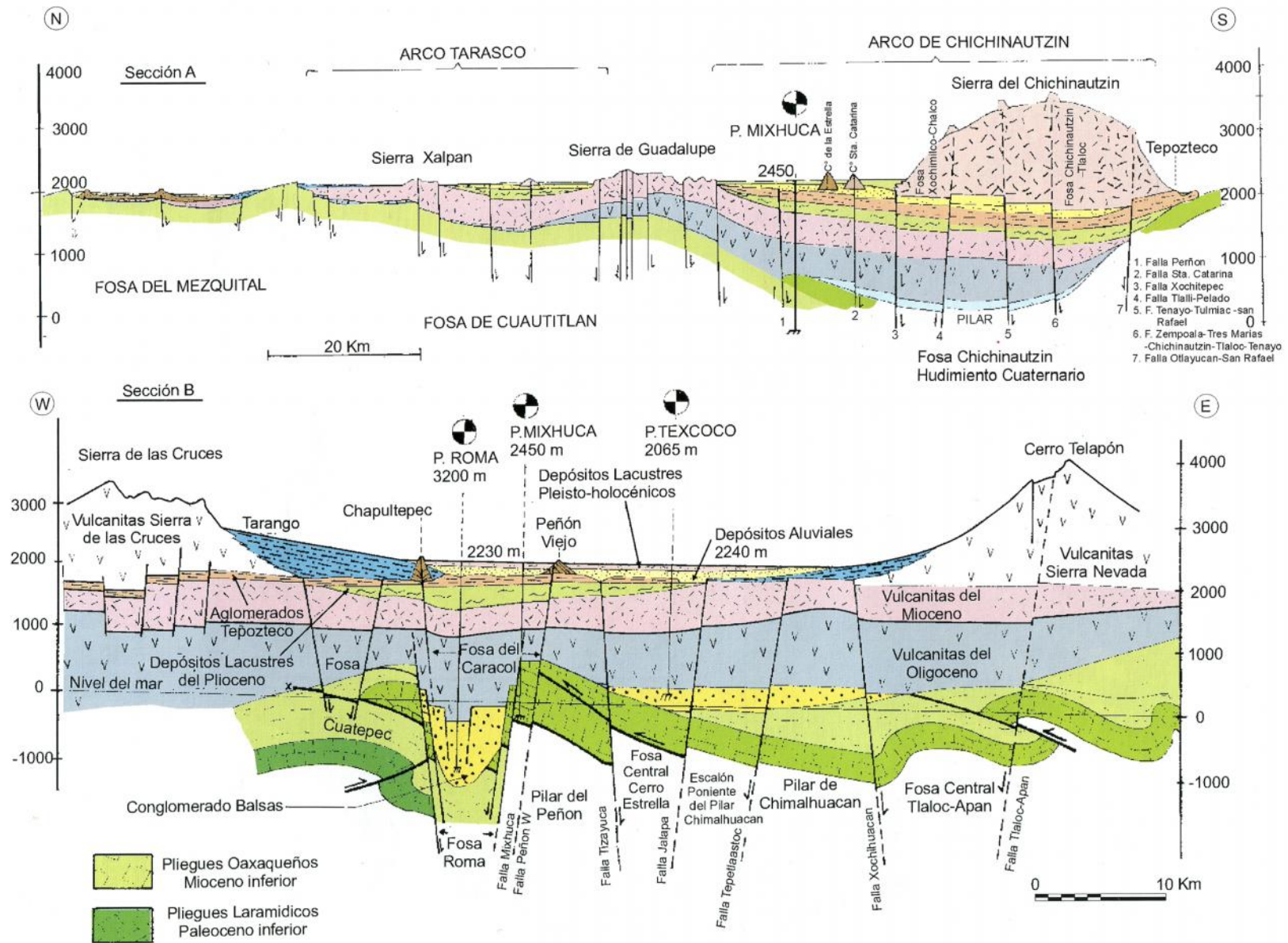


Figura 7. Secciones geológicas de la Cuenca

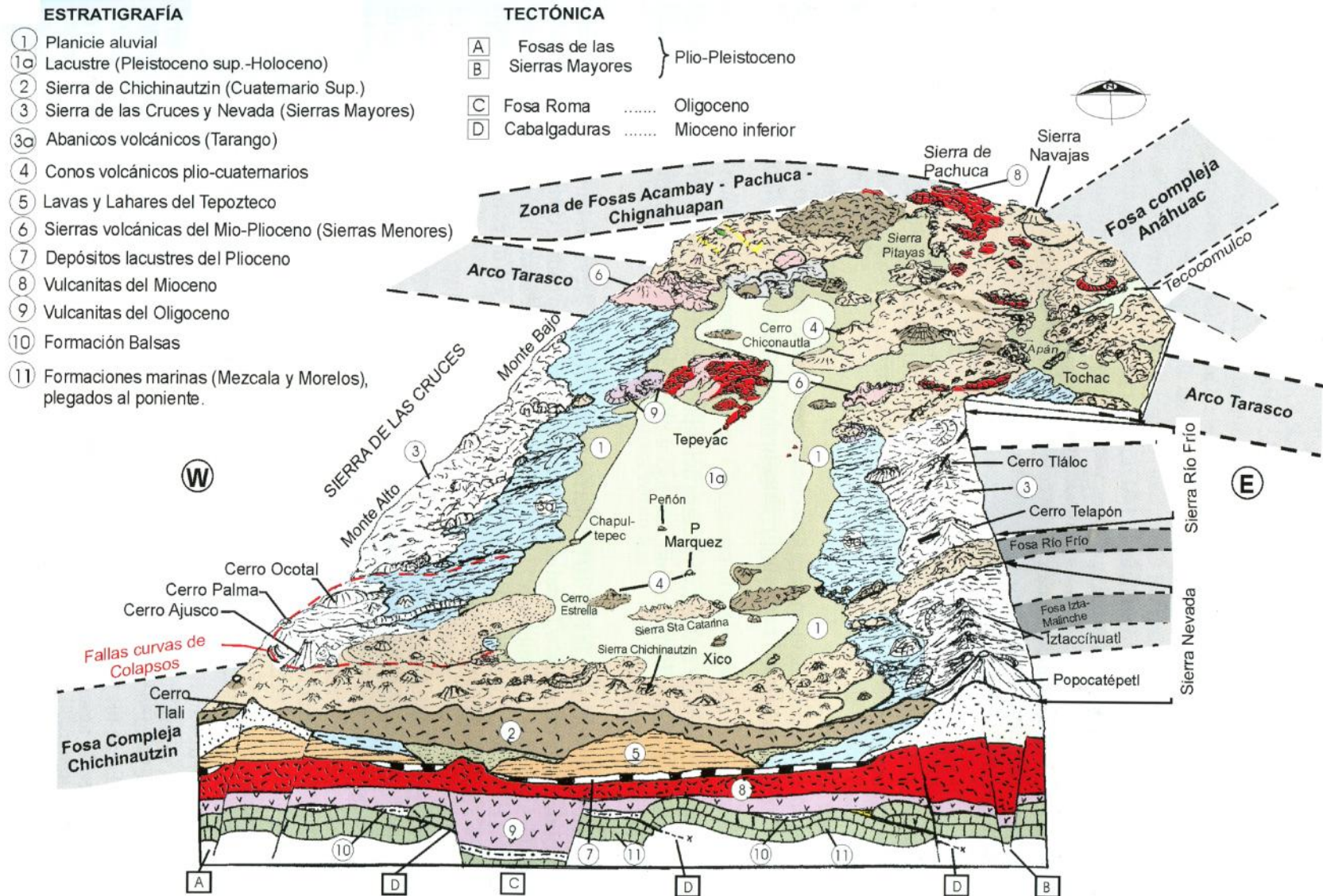


Figura 8. Geología y morfología tridimensional de la cuenca

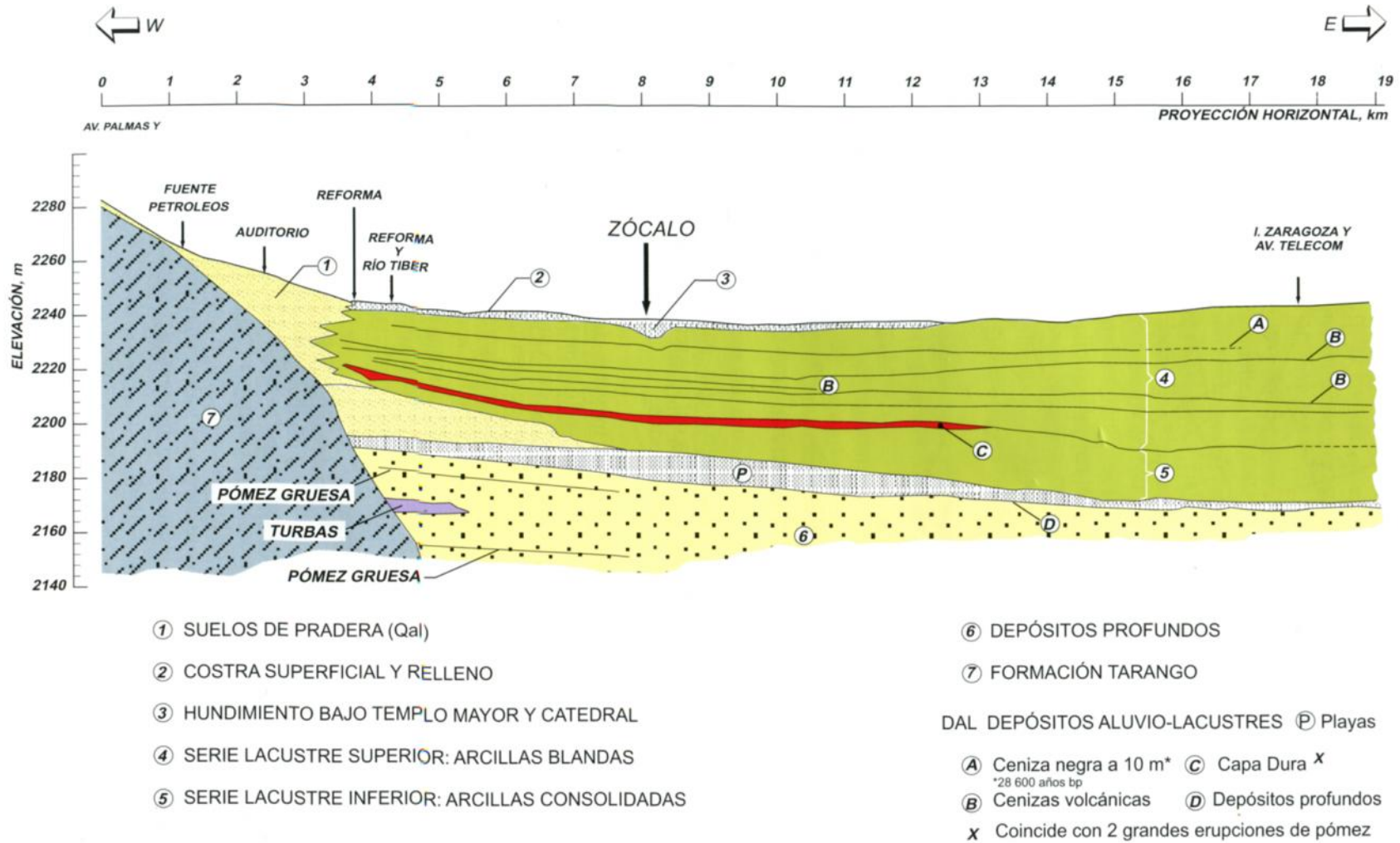


Figura 9. Secuencias pleistocénicas debajo de la Ciudad

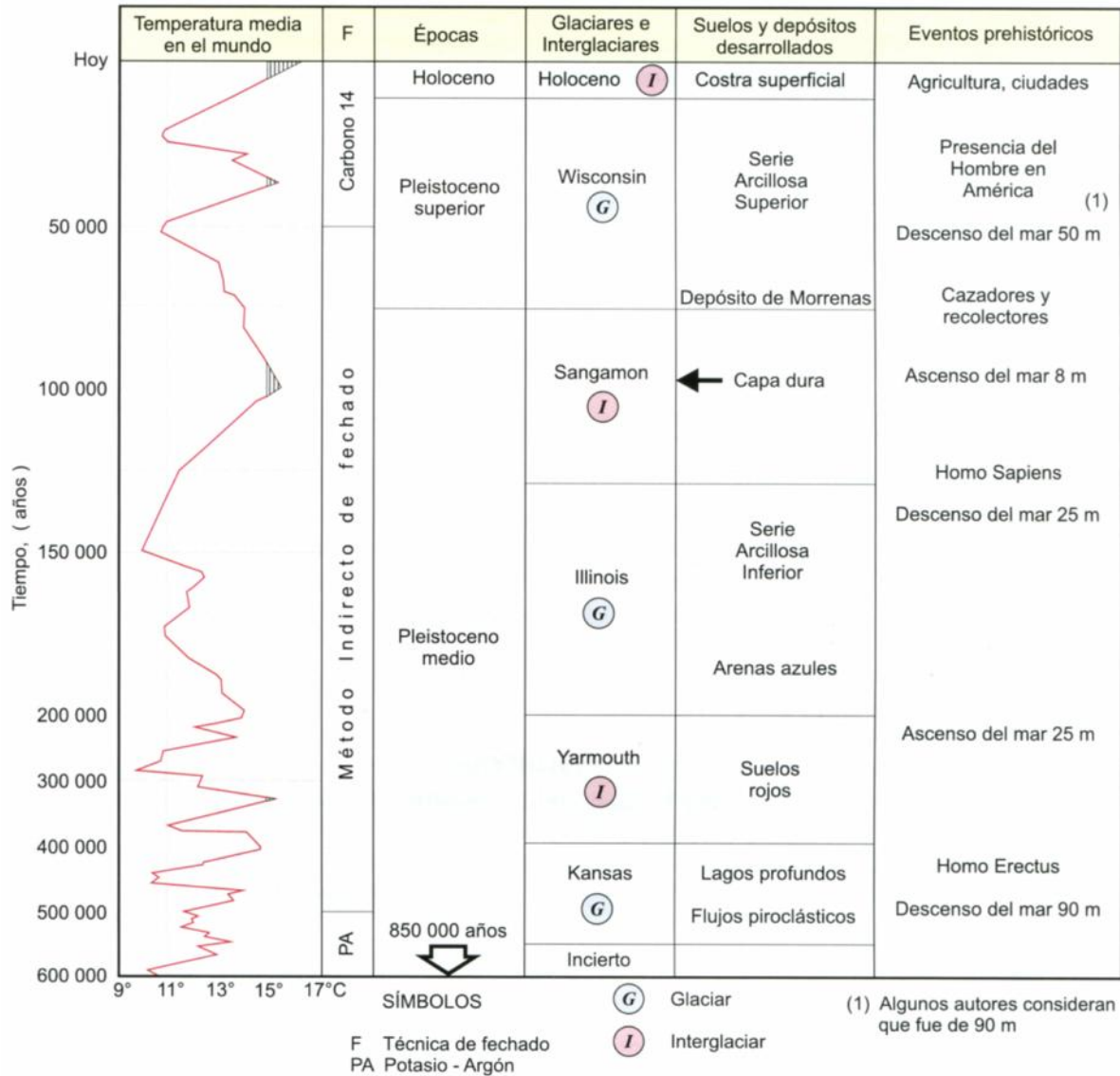


Figura 10. Eventos geológicos ambientales durante el Holoceno y Pleistoceno

2.2 Información geotécnica disponible

De acuerdo con la zonificación para el Distrito Federal (Referencia 3), el predio se localiza en la zona geotécnica denominada *Zona III* (Ver Figura 11), en la zona de *Lago*, específicamente en la subzona *Lago Virgen* (Referencia 2), corresponde al sector oriente del lago, cuyos suelos prácticamente han mantenido sus propiedades mecánicas desde su formación, con algunas variaciones relativamente recientes debido al incremento de cargas en la superficie y el bombeo profundo para extracción de agua.

2.3 Modelo Geotécnico de diseño

2.3.1 Trabajos de campo

Para precisar la secuencia estratigráfica del sitio se realizó un sondeo de exploración geotécnica con la técnica de cono eléctrico (SCE-1) y un sondeo de muestreo selectivo (SMS-1).

Sondeo de exploración. Se llevó hasta una profundidad de 51 m; el sondeo de cono permitió definir las propiedades de resistencia y espesores de los estratos compresibles. En la Figura 12 se muestra la variación de la resistencia de punta registrada en el cono.

Sondeo de muestreo selectivo. A partir de los resultados de la exploración geotécnica se realizó un sondeo de muestreo selectivo a 34.6 m de profundidad extrayendo muestras inalteradas, con un muestreador de pared delgada para suelos blandos (tubo shelby), para determinar las propiedades de compresibilidad y resistencia de los estratos de interés.

Nivel del brocal. Los brocales de los sondeos (SCE-1 y SMS-1) estuvieron referidos al nivel del terreno natural.

NAF. El nivel de aguas freáticas se encontró a los 0.65 m de profundidad.

2.3.2 Interpretación estratigráfica.

Con base en el sondeo de exploración geotécnica con la técnica de cono eléctrico (SCE) se precisó la secuencia estratigráfica del sitio. Se definieron las condiciones estratigráficas que se resumen a continuación (Figura 13):

Costra superficial (CS), de 0.00 a 2.6 m.

Formada por limo arenoso de consistencia media a firme por efecto de secado solar, el cono eléctrico registró resistencias de punta registrada entre 5 y más de 50 kg/cm².

Formación arcillosa superior (FAS) -normalmente consolidada-, de 2.6 a 27.8 m.

Bajo la costra superficial se encuentra un potente espesor de arcilla plástica de origen lacustre, de consistencia baja, con resistencias a la penetración del cono eléctrico media de 5.0 kg/cm². Se registraron cinco lentes duros (marcadores) a los 9.7, 19.1, 20.5, 22.5 y 24.1 m de profundidad.

Capa dura (CD), de 27.8 a 29.6 m.

Bajo los suelos arcillosos blandos compresibles se encontró una secuencia de estratos alternados de suelos arenosos limosos, el cono registró resistencias a la penetración del cono eléctrico mayores de 100 kg/cm².

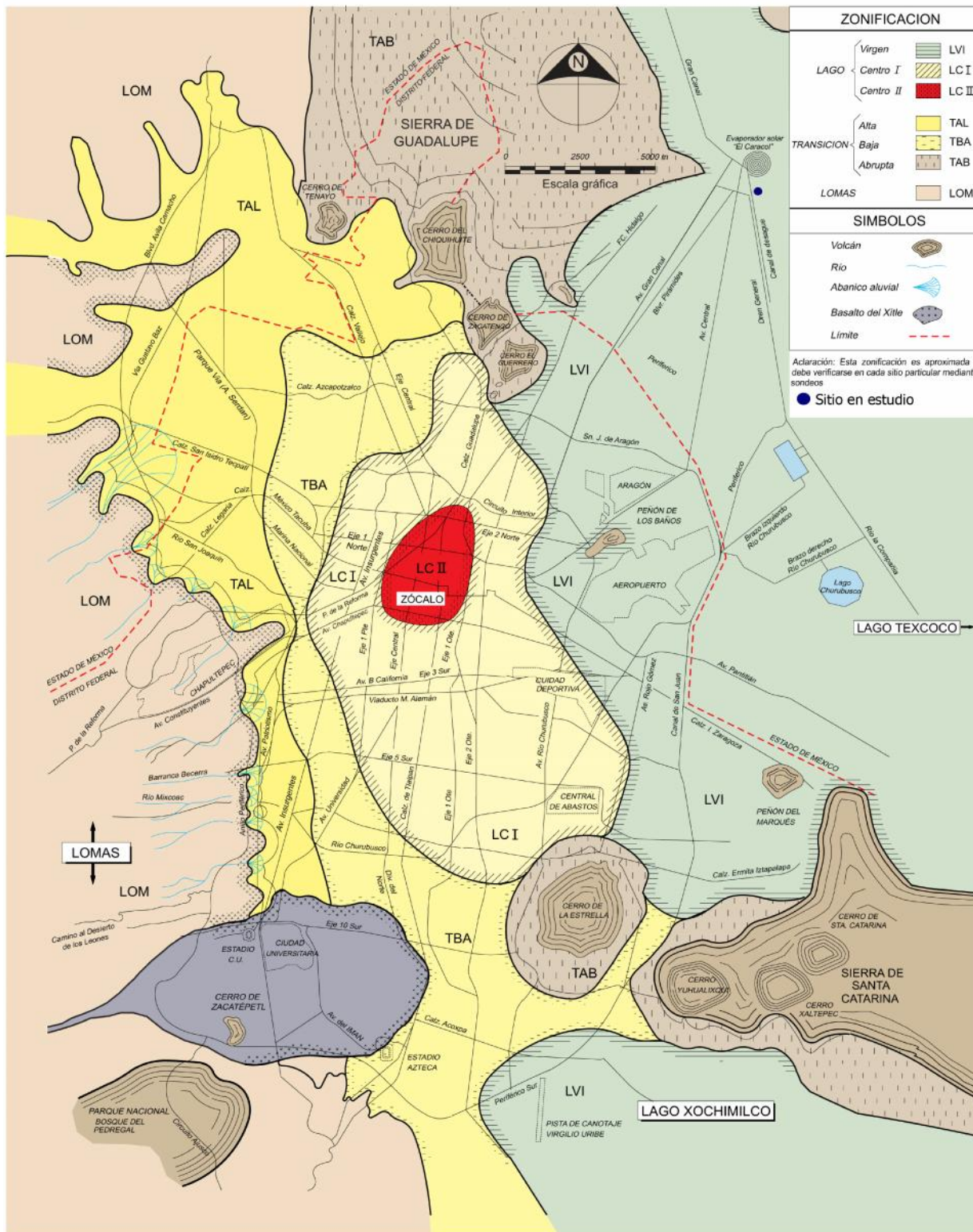


Figura 11. Zonificación geotécnica de la Ciudad de México

Formación Arcillosa Inferior (FAI), de 29.6 a 39.0 m.

Bajo la capa dura se localiza un estrato de suelos arcillosos de compresibilidad media, en el que el cono eléctrico encuentra resistencias entre 10 y 15 kg/cm²; tiene un espesor de 9.0 m y se encuentra interrumpida por delgadas capas de suelos duros (lentes) de resistencias mayores a 100 kg/cm².

Depósitos Profundos (DP), de 39.0 a 47.0 m.

Subyaciendo los suelos arcillosos de compresibilidad media se encuentran suelos de mayor resistencia, en su mayoría de naturaleza granular aunque con gran contenido de finos; en estos suelos el cono eléctrico no penetra con facilidad y registra resistencia de 45 y mayores a 100 kg/cm².

Formación Arcillosa Profunda (FAP), 47.0 a 51.0 m (profundidad máxima de exploración).

Finalmente, tenemos una arcilla profunda de mediana a baja compresibilidad donde se registra una resistencia de punta en cono eléctrico media de 25 kg/cm². Este estrato está interrumpido por dos lentes duros que alcanzan resistencias de punta superiores a los 100 kg/cm².

2.3.3 Pruebas de laboratorio

Pruebas índice

Las muestras recuperadas en el sondeo de muestreo selectivo y la penetración estándar se clasificaron en forma visual y manual en húmedo y en seco, y se determinó su contenido natural de agua.

Adicionalmente se realizaron los siguientes ensayos:

- a) Límites de consistencia líquido y plástico.
- b) Densidad de sólidos.

Basándose en los resultados de los ensayos mencionados se procedió a identificar los principales depósitos que constituyen el subsuelo, clasificándolos conforme al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).

Pruebas mecánicas

Una vez definida la estratigrafía del subsuelo, se realizaron las pruebas mecánicas necesarias para determinar las propiedades de resistencia de los depósitos del subsuelo. Se realizaron las siguientes pruebas:

- a) Triaxiales UU (no consolidadas no drenadas)
- b) Consolidación unidimensional

Los registros de los ensayos triaxiales UU y de las pruebas de consolidación se presentan en el Anexo 2 y en la Tabla 1 y en la Tabla 2 se muestran los parámetros de resistencia obtenidos.

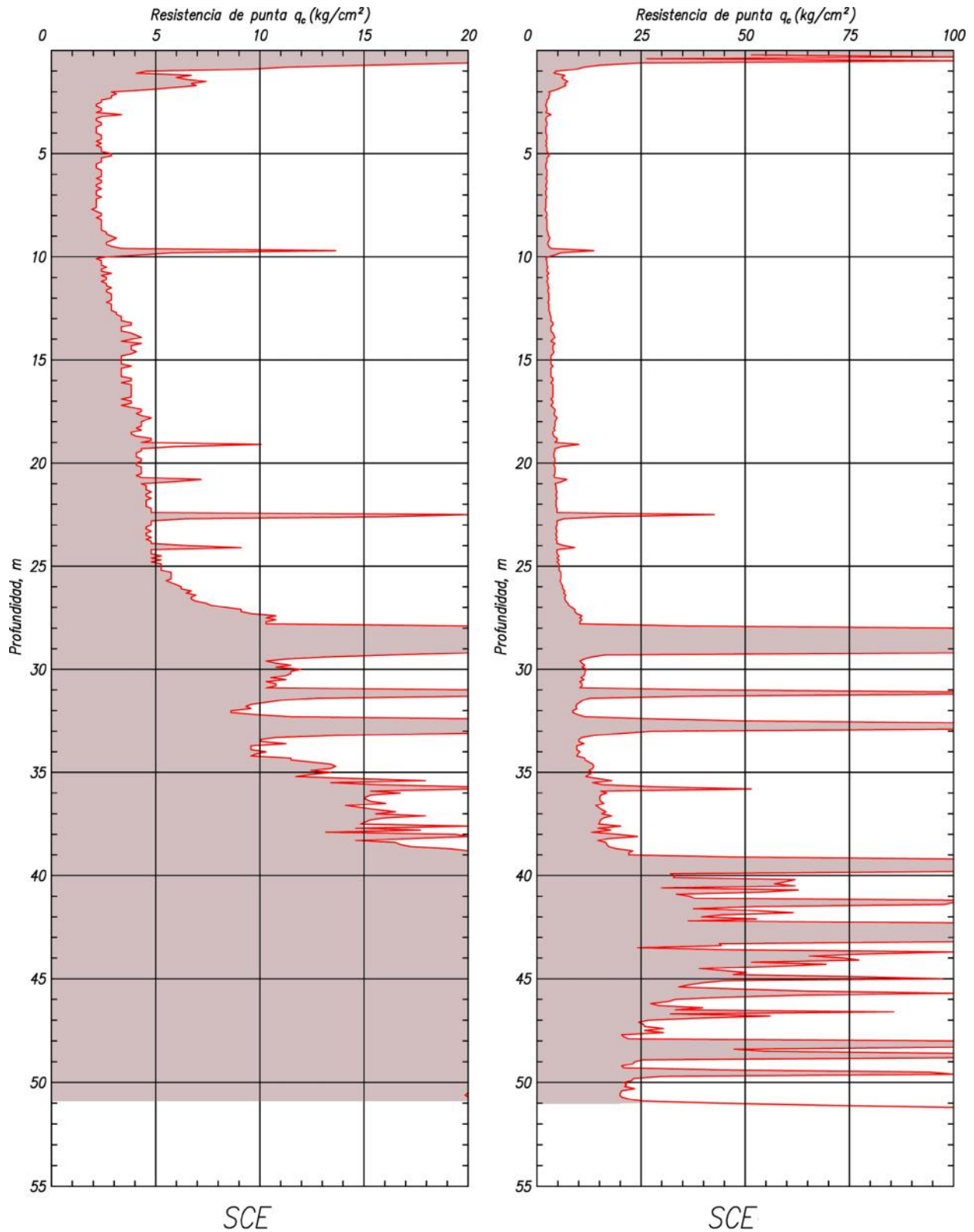


Figura 12. Sondeo de cono eléctrico

Tabla 1. Resultados de ensayos de consolidación

| Sondeo | Sondeo de cono | Prof m | ω % | γ t/m ³ | Ss | e_o | σ_o t/m ² | σ_c t/m ² | OCR |
|--------|----------------|--------|------------|---------------------------|-------|-------|-----------------------------|-----------------------------|------|
| SMS-1 | SCE-1 | 2.5 | 265 | 1.23 | 2.531 | 6.52 | 1.62 | 2.8 | 1.73 |
| | | 3.5 | 248 | 1.24 | 2.649 | 6.42 | 1.88 | 2.7 | 1.44 |
| | | 5.5 | 263 | 1.24 | 2.676 | 6.81 | 2.34 | 3.0 | 1.28 |
| | | 6.5 | 330 | 1.23 | 2.417 | 7.44 | 2.58 | 2.8 | 1.09 |
| | | 7.5 | 509 | 1.18 | 2.600 | 12.38 | 2.80 | 2.8 | 1 |
| | | 8.7 | 385 | 1.22 | 2.600 | 9.36 | 3.08 | 3.0 | 1 |
| | | 9.3 | 324 | 1.23 | 2.600 | 7.99 | 3.22 | - | - |
| | | 13.2 | 273 | 1.27 | 2.853 | 7.39 | 4.26 | 5.7 | 1.33 |
| | | 18.0 | 262 | 1.30 | 2.958 | 7.28 | 5.54 | 7.5 | 1.35 |
| | | 21.9 | 290 | 1.29 | 3.150 | 8.50 | 6.74 | 8.0 | 1.19 |
| | | 27.3 | 262 | 1.29 | 2.944 | 7.27 | 12.54 | 21.5 | 1.71 |
| | | 34.5 | 148 | 1.41 | 2.944 | 4.18 | 23.26 | 23.3 | 1 |

| | | | |
|----------|------------------------------|------------|------------------------------|
| ω | contenido de agua | e_o | relación de vacíos inicial |
| χ | peso volumétrico | σ_o | esfuerzo efectivo |
| Ss | densidad de sólidos | σ_c | esfuerzo de preconsolidación |
| SMS | sondeo de muestreo selectivo | OCR | relación de preconsolidación |
| SCE | sondeo de cono eléctrico | | |

Tabla 2. Resultados de ensayos triaxiales UU

| Sondeo | Sondeo de cono | Prof m | ω % | Gw % | γ t/m ³ | C kg/cm ² | E kg/cm ² | q_c kg/cm ² | N_K |
|--------|----------------|--------|------------|------|---------------------------|----------------------|----------------------|--------------------------|-------|
| SMS-1 | SCE-1 | 1.7 | 189 | 97 | 1.27 | 0.375 | 57.0 | 2.3 | 6.1 |
| | | 2.5 | 228 | 97 | 1.17 | 0.125 | 15.7 | 2.3 | 18.4 |
| | | 3.5 | 219 | 100 | 1.25 | 0.155 | 14.7 | 2.3 | 14.8 |
| | | 4.5 | 239 | 100 | 1.24 | 0.140 | 19.0 | 2.3 | 16.4 |
| | | 5.5 | 192 | 99 | 1.27 | 0.145 | 17.7 | 2.3 | 15.9 |
| | | 6.5 | 240 | 100 | 1.24 | 0.160 | 21.7 | 2.3 | 14.4 |
| | | 7.5 | 296 | 100 | 1.18 | 0.190 | 18.0 | 2.3 | 12.1 |
| | | 8.7 | 256 | 100 | 1.22 | 0.165 | 23.0 | 2.3 | 13.9 |
| | | 9.3 | 213 | 98 | 1.23 | 0.150 | 19.3 | 2.3 | 15.3 |
| | | 13.2 | 167 | 96 | 1.27 | 0.265 | 29.0 | 3.8 | 14.3 |
| | | 18.0 | 201 | 99 | 1.26 | 0.265 | 37.6 | 3.8 | 14.3 |
| | | 27.2 | 146 | 98 | 1.34 | 0.930 | 123.3 | 4.8 | 5.2 |
| | | 34.5 | 112 | 96 | 1.41 | 0.910 | 104.3 | 11.0 | 12.1 |

| | | | |
|----------|---------------------|-------|-----------------------|
| ω | contenido de agua | E | módulo de elasticidad |
| χ | peso volumétrico | q_c | resistencia de punta |
| Gw | grado de saturación | N_K | factor de correlación |
| C | cohesión | | |

2.3.4 Modelo geotécnico de diseño

Las propiedades mecánicas se definieron con base en las pruebas de laboratorio, correlación con el cono eléctrico y utilizando la Referencia 4 y 5. El modelo geotécnico de diseño consta de seis unidades, en la Tabla 3 se resume la estratigrafía y los parámetros considerados en los cálculos; con estos datos se integró el modelo de diseño para la lumbrera en estudio (ver Figura 13).

Tabla 3. Modelo geotécnico de diseño

| Estrato | Descripción | Profundidad m | q_c kg/cm ² | N_k | χ t/m ³ | C t/m ² | w | E t/m ² |
|---------|-------------|------------------|-----------------------------|-------|----------------------------|-------------------------|-----|-------------------------|
| A | CS | 0.0 a 2.6 | 56 | 15 | 1.4 | 4.0 | 25 | 350 |
| B | SAS | 2.6 a 9.7 | 2.3 | 14.5 | 1.23 | 1.58 | - | 200 |
| | | 9.7 a 19.0 | 3.8 | 14 | 1.26 | 2.7 | - | 300 |
| | | 19.0 a 27.8 | 4.8 | 10 | 1.31 | 4.8 | - | 450 |
| C | CD | 27.8 a 29.60 | 50 | - | 1.6 | 15 | 30 | 600 |
| D | SAI | 29.60 a 39.0 | 11 | 12.1 | 1.35 | 9.1 | - | 500 |
| E | DP | 39.0 a 47.00 | 40 | - | 1.65 | 12.5 | 35 | 650 |
| F | SAP | 47.00 a 51.00 | 20 | 24 | 1.4 | 8.3 | 12 | 450 |

| | | | |
|-----|--------------------------|--------|-----------------------|
| CS | costra superficial | E | módulo de elasticidad |
| SAS | serie arcillosa superior | q_c | resistencia de punta |
| CD | capa dura | N_k | factor de correlación |
| SAI | serie arcillosa inferior | C | cohesión |
| DP | depósitos profundos | χ | peso volumétrico |

2.4 Esfuerzos geoestáticos e hidráulicos

En la Tabla 4 se presentan las lecturas de una estación piezométrica instalada en el sitio.

Con base en esta información se determinaron los diagramas de esfuerzos totales, presión de poro y esfuerzos efectivos, los cuales se resumen en la Tabla 5 y en la Figura 13 se presentan estos resultados de manera gráfica.

Tabla 4. Estación piezométrica

| Piezómetro Número | Profundidad del bulbo m | Nivel del agua m | Presión piezométrica, t/m ² |
|----------------------|-------------------------------|------------------------|--|
| PA-1 | 73.05 | 36.75 | 36.30 |
| PA-2 | 58.35 | 17.60 | 40.75 |
| PA-3 | 39.50 | 17.52 | 21.98 |
| PA-4 | 28.10 | 5.74 | 22.36 |
| PA-5 | 23.55 | 0.77 | 22.78 |
| PA-6 | 10.15 | 0.65 | 9.50 |
| TO-1 | 6.00 | 0.63 | ---- |

PA piezómetro abierto

Tabla 5. Cálculo de esfuerzos verticales

| Estrato | Profundidad | χ | Profundidad de análisis | Esfuerzos totales, p_o | Presión hidrostática | Presión piezométrica, u_o | Esfuerzos efectivos, \dot{t}_o |
|---------|--------------|------------------|-------------------------|--------------------------|----------------------|-----------------------------|----------------------------------|
| | m | t/m ³ | m | t/m ² | t/m ² | t/m ² | t/m ² |
| | | | 0.0 | 0.0 | | | 0.0 |
| A | 0.0 a 2.6 | 1.4 | 2.6 | 3.64 | 1.97 | 1.97 | 1.67 |
| B | 2.6 a 9.7 | 1.2 | 9.7 | 12.37 | 9.07 | 9.07 | 3.30 |
| | 9.7 a 19.0 | 1.2 | 19.0 | 24.09 | 18.37 | 18.28 | 5.81 |
| | 19.0 a 27.80 | 1.2 | 27.8 | 35.62 | 27.37 | 22.38 | 13.24 |
| C | 27.8 a 29.6 | 1.6 | 29.6 | 38.50 | 28.97 | 22.32 | 16.18 |
| D | 29.6 a 35.0 | 1.35 | 35.0 | 46.11 | 34.37 | 22.14 | 23.97 |
| | 35.0 a 39.0 | 1.35 | 39.0 | 51.75 | 38.37 | 22.00 | 29.75 |
| E | 39.0 a 47.0 | 1.65 | 47.0 | 64.95 | 46.37 | 29.46 | 35.49 |
| F | 47.0 a 51.0 | 1.4 | 51.0 | 70.55 | 50.37 | 33.44 | 37.11 |

3. ANÁLISIS Y DISEÑO GEOTÉCNICO DE LA LUMBRERA

3.1 Características geométricas y materiales

La lumbrera de estudio tiene las siguientes especificaciones:

- a) Diámetro interior de la lumbrera: 13.0 m
- b) Profundidad de desplante: 46.0 m
- c) Profundidad de excavación: 35.0 m
- d) El concreto para el muro Milán será tipo estructural, con una resistencia especificada a la compresión simple f'_c de 350 kg/cm²
- e) El peso volumétrico considerado para el concreto reforzado es de 2.4 t/m³
- f) Acero de refuerzo corrugado, con límite elástico mínimo igual a 4200 kg/cm² en los conectores de cortante, y de 5000 kg/cm² en las mallas electrosoldadas.
- g) Módulo de elasticidad del acero igual a 2,160,000 kg/cm²
- h) Módulo de elasticidad del concreto igual a $14000\sqrt{f'_c} = 261,916$ kg/cm².
- i) El acero estructural tendrá un módulo de elasticidad E de 2.1E6 kg/cm².
- j) Refuerzo del muro milán: varillas del No. 8 @20 cm en dos lechos y recubrimiento de 7.5 cm.

Figura 13 Modelo

3.2 Empujes

Presiones de diseño durante la construcción. Para determinar las presiones que el suelo ejercerá sobre el revestimiento, se calcularon la magnitud y la distribución de los empujes laterales con base en el modelo de equilibrio plástico del suelo de Terzaghi y Peck para el diseño de ademes; de acuerdo con esta teoría, la magnitud del empuje depende principalmente de la deformación que el suelo presente durante la excavación. Si la rigidez de la estructura de contención permite que el suelo se deforme lo necesario, su empuje lateral pasa de la condición de reposo a una condición de empuje actuante activo; sin embargo, la continuidad estructural del muro genera una redistribución de presiones que corresponde con un valor constante, p_{rm} , en un espesor entre una y dos veces el diámetro de la lumbrera, D , por arriba del fondo de la excavación; este criterio considera el efecto de la profundización de la lumbrera conforme avanza la excavación.

Las ecuaciones utilizadas son las siguientes (Referencia 6):

$$p_{az} = K_a \cdot (\gamma \cdot z - u_z + q_s) - 2c \cdot \sqrt{K_a} + u_z \quad (1)$$

$$K_a = \frac{1}{N_w} = \tan^2 \left(45^\circ - \frac{W}{2} \right) \quad (2)$$

$$p_{rm} = \frac{E_a}{D} \quad (3)$$

| | | |
|--------|----------|--|
| donde: | p_{az} | presión horizontal activa a la profundidad z |
| | K_a | coeficiente de presión horizontal para la condición activa de Rankine |
| | W | ángulo de fricción interna del suelo |
| | c | cohesión del suelo |
| | γ | peso volumétrico del suelo |
| | z | profundidad de análisis |
| | q_s | sobrecarga en la superficie, se considera un valor de 3.0 t/m ² |
| | u_z | presión de poro, durante la construcción, a la profundidad z |
| | E_a | empuje de diseño (área del diagrama de presión horizontal) en un espesor igual a D por arriba del fondo de la excavación |

Las presiones negativas que se producen en el suelo no se transmiten al muro, por tanto las presiones de cálculo incluyen solamente la zona de compresión.

Los resultados de los cálculos se enlistan en la Tabla 6; con estos datos se dibujaron los diagramas de la Figura 14, en los cuales se observa la presión activa, así como la redistribución de presiones que definen la envolvente de diseño para el revestimiento primario.

Tabla 6. Cálculo de la presión activa y presión redistribuida de diseño, y presión de diseño para el revestimiento definitivo

| Profundidad | Presión activa | Profundidad | Presión redistribuida de diseño | Profundidad | Presión de diseño del revestimiento definitivo |
|-------------|------------------|-------------|---------------------------------|-------------|--|
| m | t/m ² | m | t/m ² | m | t/m ² |
| 0.00 | 0.00 | 0.00 | 3.59 | 0.0 | 1.5 |
| 0.00 | -3.88 | 6.0 | 3.59 | 2.6 | 4.43 |
| 2.6 | -1.23 | 6.0 | 9.87 | 9.7 | 12.22 |
| 2.6 | 3.48 | 14.0 | 9.87 | 19.0 | 22.73 |
| 9.7 | 12.21 | 14.0 | 17.79 | 27.8 | 32.89 |
| 9.7 | 9.97 | 21.0 | 17.79 | 29.6 | 35.23 |
| 19.0 | 21.69 | 21.0 | 22.54 | 35.0 | 41.74 |
| 19.0 | 18.57 | 24.2 | 22.54 | 39.0 | 46.56 |
| 27.8 | 29.02 | 24.2 | 26.76 | 47.0 | 55.79 |
| 27.8 | 10.47 | 29.6 | 26.76 | 51.0 | 61.50 |
| 29.6 | 11.39 | 29.6 | 29.7 | | |
| 29.6 | 23.30 | 34.1 | 29.7 | | |
| 35.0 | 30.91 | 47.0 | 37.25 | | |
| 39.0 | 36.55 | 51.0 | 39.6 | | |
| 39.0 | 17.86 | | | | |
| 47.0 | 26.88 | | | | |
| 47.0 | 42.63 | | | | |
| 51.0 | 47.75 | | | | |

Presiones de diseño para el revestimiento definitivo. Para calcular este diagrama de presión lateral se utilizó la ecuación (4), con un coeficiente de empuje de tierras en reposo $K_0 = 0.5$.

$$p_{0z} = K_0 \cdot (x \cdot z - u_z + q_s) + u_z \quad (4)$$

En la Tabla 6 se muestran los resultados obtenidos y en la Figura 15 se observa el diagrama de presión de poro y la distribución piezométrica.

Cálculo de la presión activa y la presión de diseño del revestimiento primario, según Tamez et al., 1987

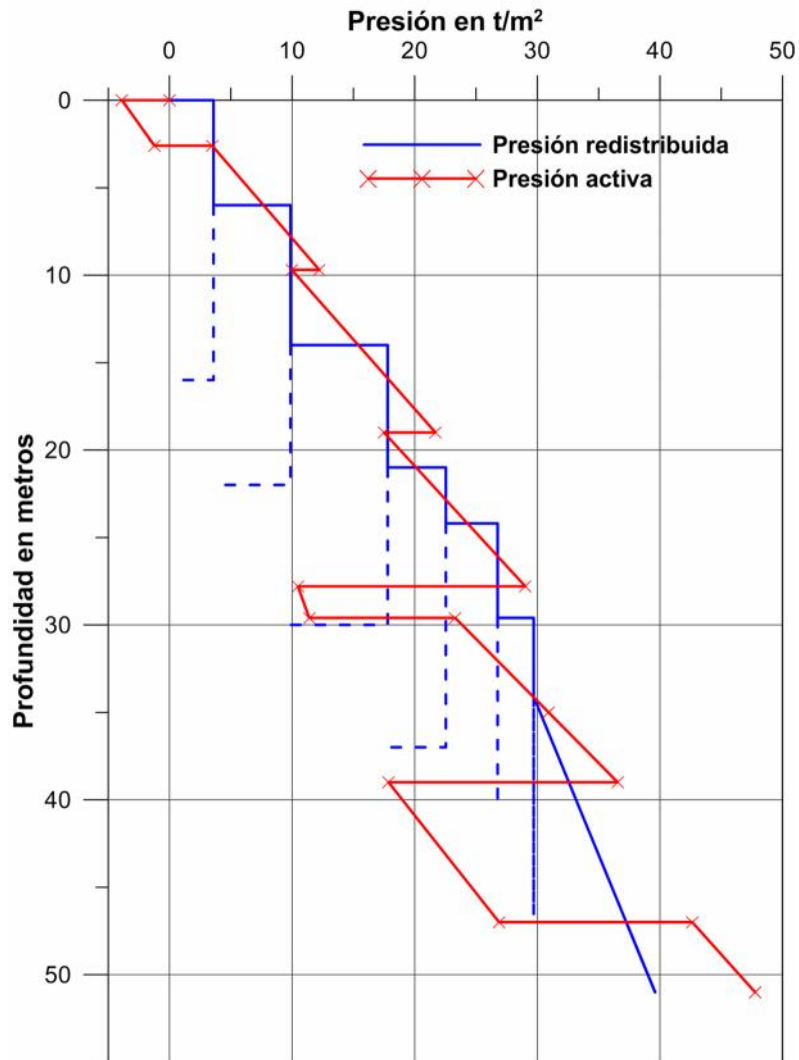


Figura 14. Presiones de diseño para el revestimiento primario

Cálculo de la presión de diseño para el revestimiento definitivo, según Tamez et al., 1987

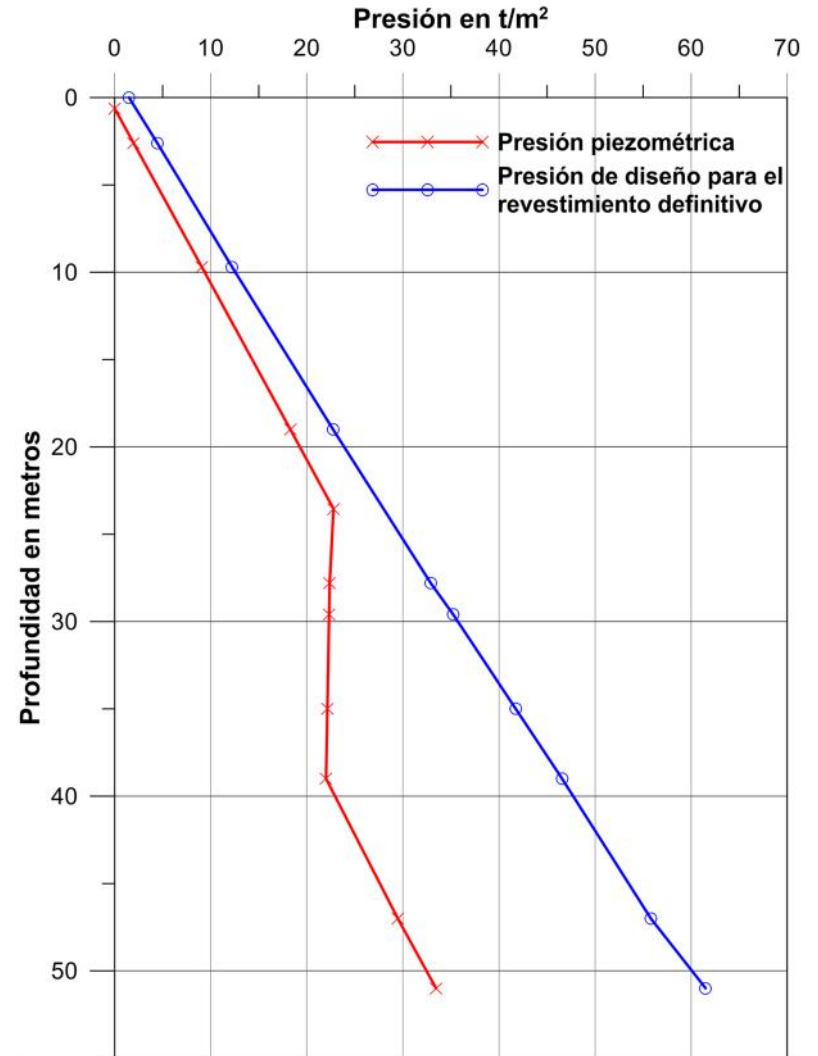


Figura 15. Presiones de diseño para el revestimiento definitivo

3.3 Falla general del fondo

La falla de fondo por esfuerzo cortante, se presenta en arcillas blandas y saturadas, manifestándose como un levantamiento brusco del fondo provocado por el desalojo del material simultáneamente con el hundimiento repentino de la superficie del terreno aledaño a la excavación. La rigidez estructural del muro introduce dos acciones favorables ante la falla del suelo en la que se empotra el muro: aquella producida por el momento resistente del muro y la otra por la fricción que se desarrolla entre el muro y el suelo.

En la Figura 16 se muestra el mecanismo de falla de fondo en excavaciones profundas ademas.

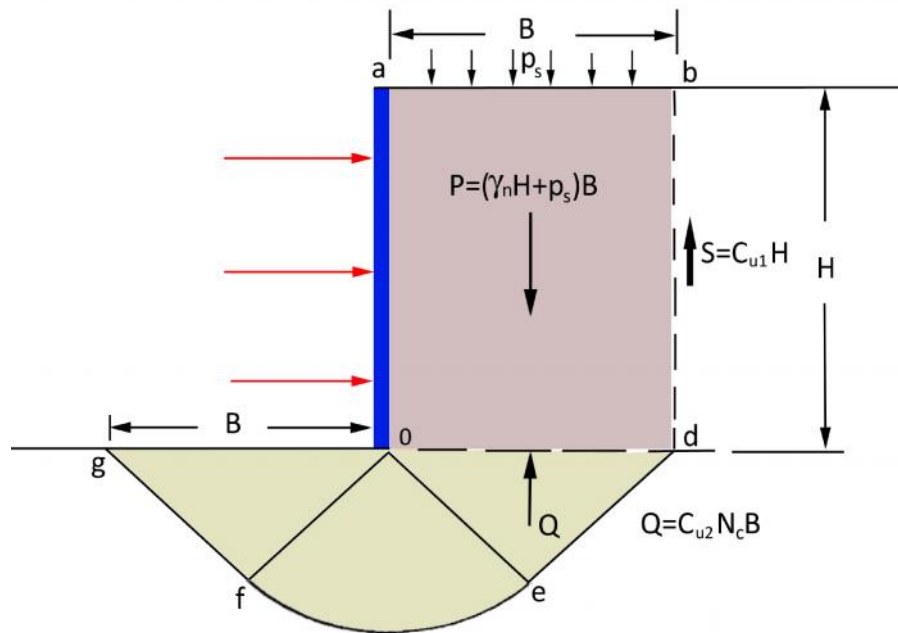


Figura 16. Mecanismo de Terzagui-Prandtl para la falla de fondo

El factor de seguridad que debe ser superior a 1.7 (Referencia 6), se determina mediante la relación entre los momentos de las fuerzas resistentes y de las fuerzas actuantes; para un depósito homogéneo, la ecuación simplificada para un mecanismo de falla tridimensional es:

$$(FS)_f = \frac{5.14 \cdot \left(1 + 0.2 \cdot \frac{H}{B}\right) \cdot \left(1 + 0.2 \cdot \frac{B}{L}\right) \cdot c_u}{(\gamma \cdot H) + q_s} \geq 1.7 \quad (5)$$

- donde:
- c_u resistencia no drenada media a lo largo de la superficie de falla, la cual se extiende entre 2.5D por arriba del fondo de la excavación y 0.7B por debajo de esa profundidad, t/m^2
 - γ peso volumétrico del suelo, t/m^3
 - H profundidad de análisis
 - B ancho de la excavación
 - L longitud del tramo a excavar
 - q_s sobrecarga en la superficie, $1.5 t/m^2$

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

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

En la Tabla 7 y en la Figura 17 se muestran los resultados obtenidos donde se aprecia que a partir de los 23.5 m se presentará falla de fondo.

Tabla 7. Falla general del fondo

| ESTRATO | Material | Profundidad de calculo ml | FS_f |
|---------|----------|---------------------------|--------|
| A | CS | 2.60 | 9.36 |
| B | FAS | 9.70 | 3.68 |
| | | 12.50 | 2.32 |
| | | 15.00 | 1.99 |
| | | 19.00 | 2.06 |
| | | 23.50 | 1.78 |
| | | 27.80 | 1.59 |
| C | CD | 29.60 | 1.26 |
| D | FAI | 35.00 | 1.33 |

3.4 Falla por pateo

Este factor de seguridad se calcula con la siguiente expresión (Referencia 6), ver Figura 19:

$$(FS)_p = \frac{c \cdot L \cdot r + W \cdot l + M_p}{p_r \cdot \frac{h_p^2}{2}} \geq 1.5 \quad (6)$$

donde:

- c resistencia al corte no drenada media a lo largo de la superficie de falla
- L longitud de la superficie de falla
- r radio de la superficie de falla
- W peso saturado del suelo dentro de los límites de la superficie de falla
- l distancia del paño del muro al centro de gravedad del suelo resistente
- M_p momento flexionante resistente del muro, obtenido del diseño estructural preliminar
- p_r presión redistribuida sobre el muro
- h_p longitud del muro entre el último nivel de apuntalamiento y el nivel de desplante

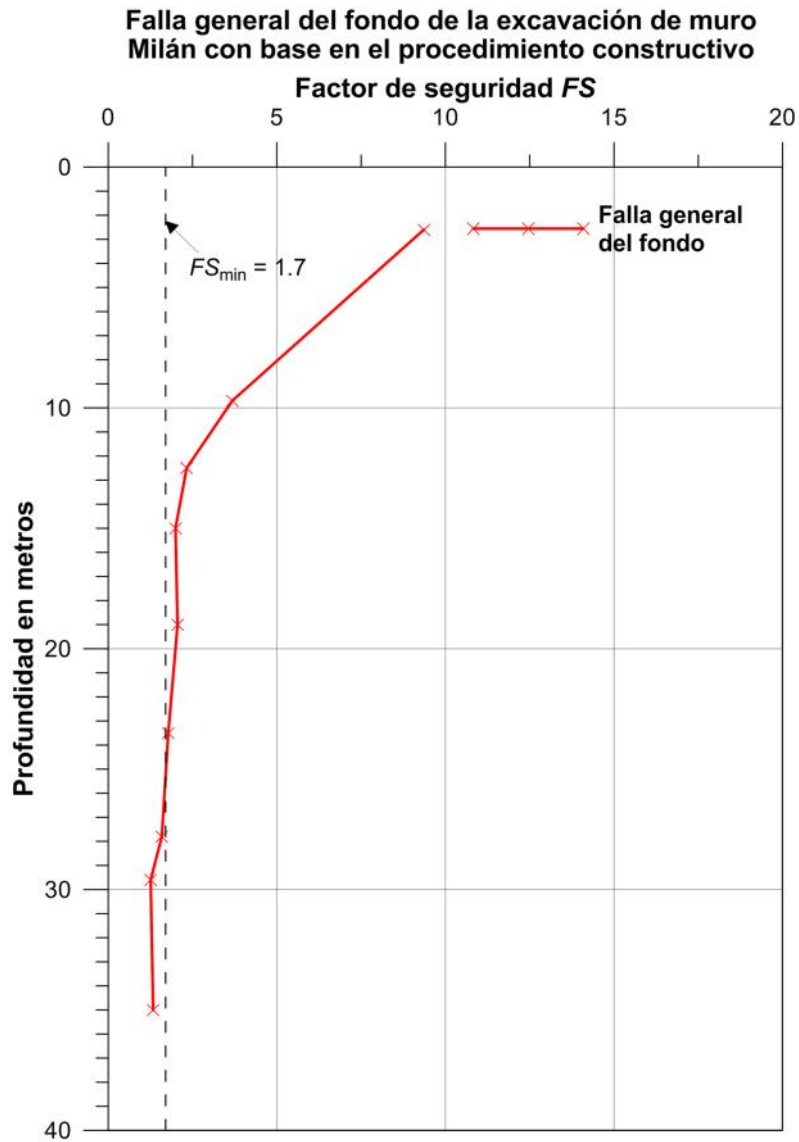


Figura 17. Falla general del fondo de la excavación

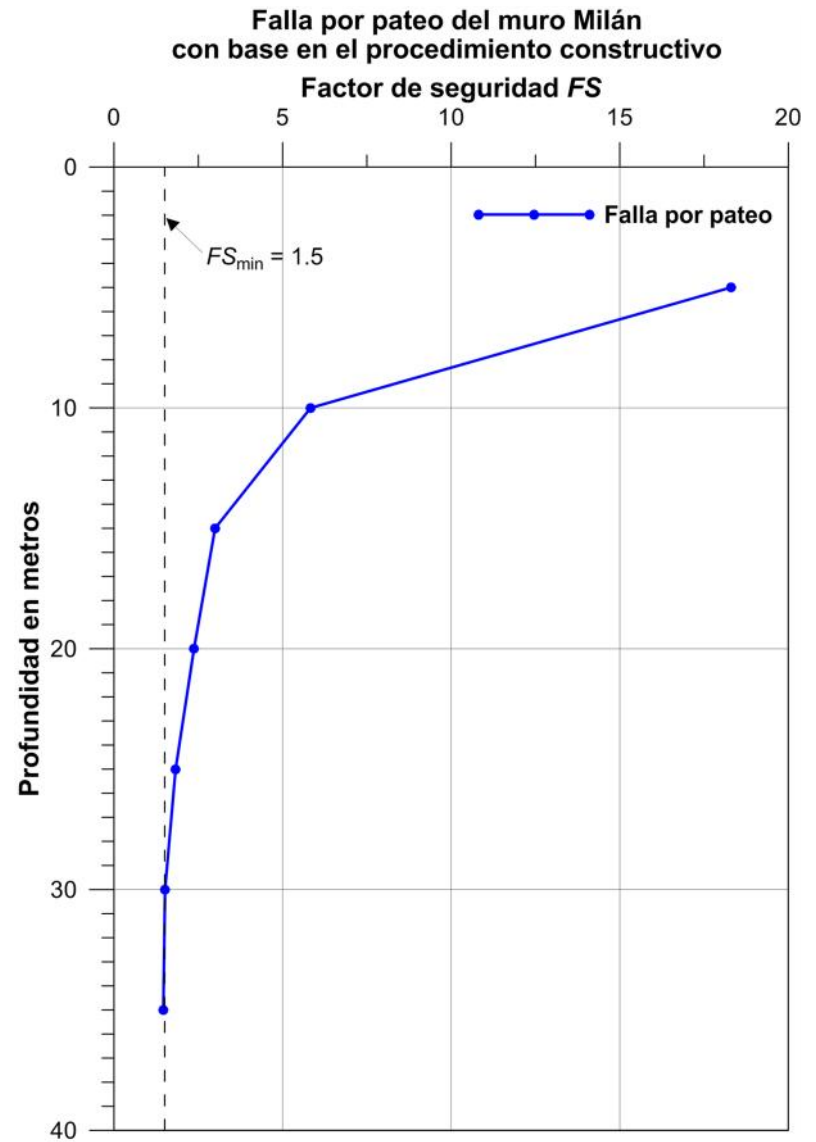


Figura 18. Falla por pateo

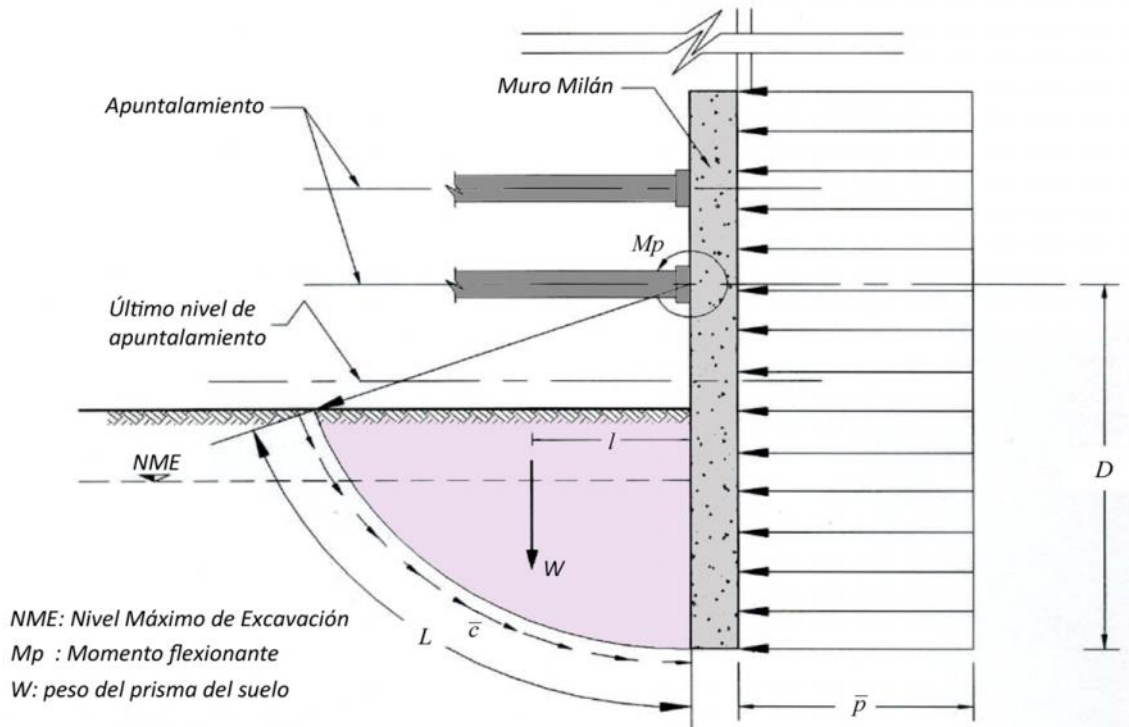


Figura 19. Mecanismo de falla por pateo del muro

En la Tabla 8 y en la Figura 18 se presentan los resultados obtenidos con base al procedimiento de excavación, considerando la colocación del apuntalamiento 3.0 m arriba del nivel de excavación de análisis.

La longitud de empotramiento resultó de 11.0 m debajo del nivel máximo de excavación de 35.0 m, por lo que la profundidad del muro Milán es de 46.0 m.

Tabla 8. Falla por pateo del muro Milán

| ESTRATO | Material | Profundidad de cálculo m1 | FS _p |
|---------|----------|---------------------------|-----------------|
| A | CS | | |
| B | FAS | 5.00 | 18.30 |
| | | 10.00 | 5.83 |
| | | 15.00 | 3.00 |
| | | 20.00 | 2.37 |
| | | 25.00 | 1.83 |
| C | CD | 30.00 | 1.51 |
| D | FAI | 35.00 | 1.46 |

3.5 Falla por flotación

Condiciones estáticas. Una vez que se diseñe el revestimiento definitivo de la lumbrera, se revisará mediante la expresión (7) que el peso total de la lumbrera más un efecto de adherencia entre las paredes de la estructura y el suelo, sea mayor que la fuerza de subpresión en la base, ver Figura 20.

$$FS_{flotEST} = \frac{W_{Lumbrera} + \bar{s}_0 \cdot A_{lateral}}{u_b \cdot a_{base}} \geq 1.4 \quad (7)$$

donde: $W_{Lumbrera}$ peso total de la lumbrera, ton
 $A_{lateral}$ adherencia lateral, m²
 a_{base} área de la base, m²
 u_b subpresión en la base, t/m²
 \bar{s}_0 adherencia media, t/m²

La variación de la adherencia con la profundidad, s_{0z} , se estima en función de los esfuerzos efectivos verticales con la siguiente ecuación (Referencia 7):

$$s_{0z} = K_{wz} \cdot \dagger_z \quad (8)$$

de donde la adherencia media se calcula como:

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

donde: K_{1w} coeficiente de fricción lateral igual a 0.3
 $H_{m\acute{a}x}$ profundidad máxima de excavación de la lumbrera
 $\int \sigma_0 dz$ área del diagrama de esfuerzos verticales efectivos en la masa de suelo

Sustituyendo en la ecuación (7) y con los siguientes datos:

$W_{Lumbrera} = 5,652.04 \text{ t/m}^2$, obtenido del análisis estructural
 $a_{lateral-Lumbrera} = 2,167.7 \text{ m}^2$ para D = 15 m y profundidad del muro de 46.0 m
 $a_{base} = 153.94 \text{ m}^2$
 Adherencia media de $\bar{s}_0 = 3.95$
 Subpresión en la base $U_{base} = 22.14 \text{ t/m}^2$

Se obtiene un factor de seguridad estática por flotación $(FS)_{flotEST} = 4.17$ superior al mínimo recomendable.

Condiciones sísmicas. En este caso se considera que el efecto de adherencia podría perderse por desplazamientos relativos entre el fuste de la lumbrera y el suelo circundante; la expresión (7) se reduce a:

$$FS_{floatSIS} = \frac{W_{Lumbrera}}{u_b \cdot a_{base-Lumbrera}} \geq 1.1 \quad (10)$$

Se obtiene un factor de seguridad sísmico por flotación $(FS)_{floatSIS} = 1.66$ superior al mínimo recomendable.

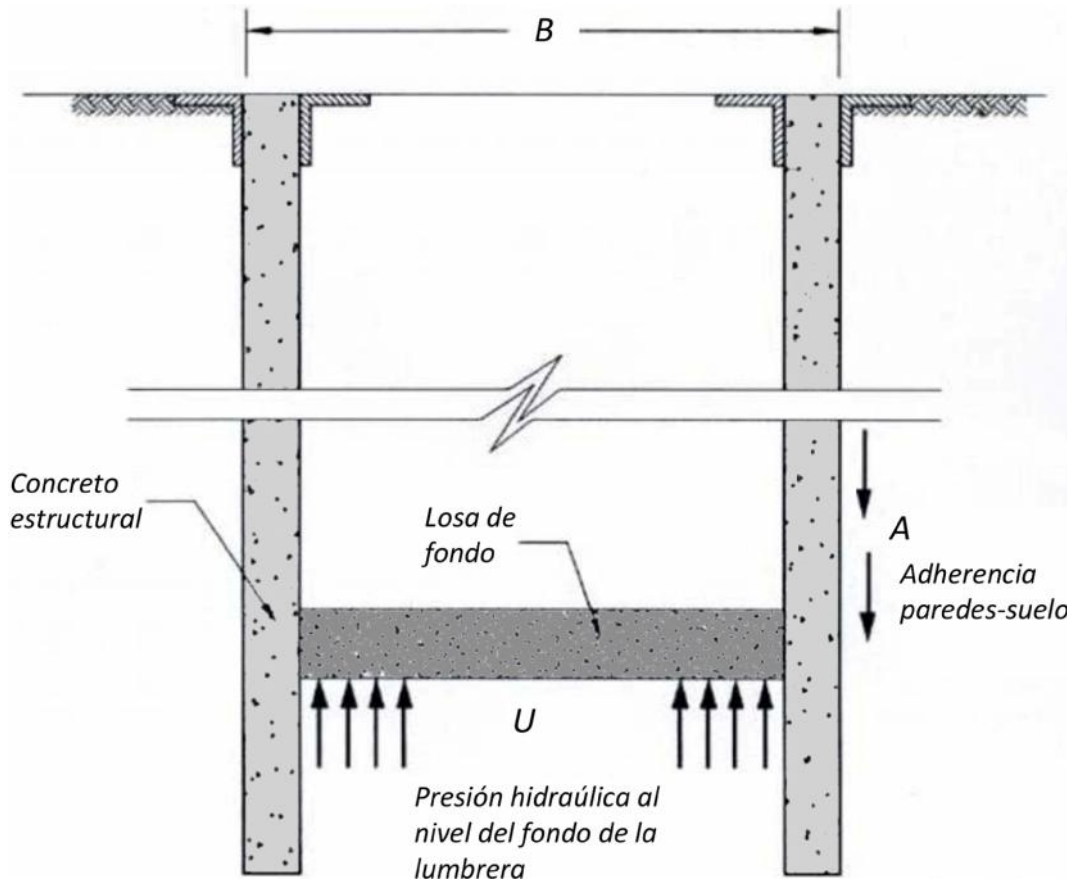


Figura 20. Mecanismo de falla por flotación

3.6 Falla por subpresión

El factor de seguridad contra la falla del fondo por el efecto de subpresión ejercida en los estratos de arena profundos se determina como (Figura 21):

$$(FS)_{sub} = \frac{P+S}{U} \geq 1.3 \quad (11)$$

donde:

- P peso saturado del prisma bajo el fondo, ton
- S fuerza resistente en las caras del prisma del fondo
- U fuerza total de subpresión en la base del prisma del fondo

Considerando las propiedades del suelo, la geometría de la excavación y despreciando la resistencia lateral del suelo, la ecuación (11) queda como:

$$(FS)_{sub} = \frac{\chi h_f \cdot f D_{int} L}{u_z a_b} \geq 1.3 \quad (12)$$

donde:

- h_f distancia entre el fondo de la excavación y el estrato permeable, 13.5 m
- L longitud de desplante del muro Milán, 46.0 m
- u_z presión piezométrica, 30.94 t/m²
- a_b área de la base, 153.94 m²
- D_{int} diámetro interior de la lumbrera, 13.0 m

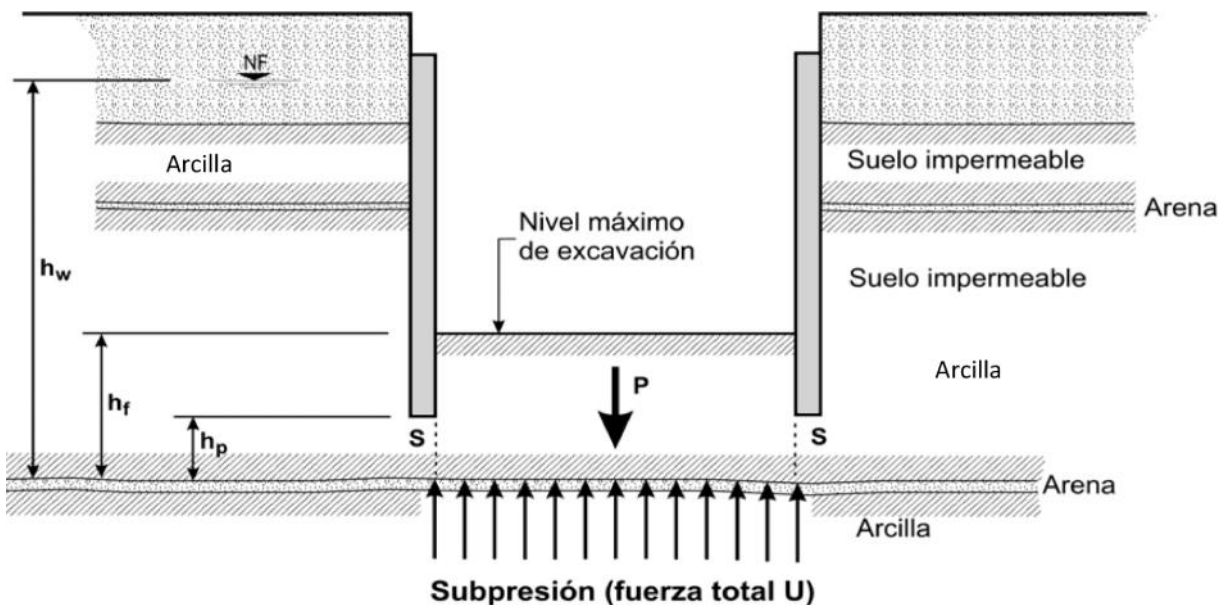


Figura 21. Mecanismo de falla por subpresión

Aplicando la expresión (12) y considerando que el lente permeable se encuentra entre los 48.0 y 49.0 m de profundidad (Ver Figura 13), nos da un factor de seguridad contra la falla por subpresión $(FS)_{sub} = 0.67$. Por lo tanto, se levantaría la arcilla del fondo de la excavación y se perdería el empuje pasivo de la pata, produciéndose así la falla por subpresión, por lo que es indispensable abatir la presión piezométrica en los estratos permeables.

Para impedir el levantamiento del fondo es necesario que la presión en la capa de arena, en el contacto superior con la arcilla, sea menor que la presión vertical total p_v , con un factor de seguridad de 2.0.

Se determinó la profundidad mínima de abatimiento, para prevenir una falla por subpresión con un factor de seguridad mínimo de 2.0, ver Tabla 9.

Tabla 9. Información para bombeo

| Profundidad de estratos permeables | | u_0 en la frontera superior del estrato permeable t/m ² | χ_f t/m ³ | h_f m | Profundidad máxima de excavación sin bombeo, (FS=1) m | Profundidad de abatimiento desde el fondo de la excavación (FS=2.0) m |
|------------------------------------|------------------------|---|------------------------------|------------|--|--|
| Frontera superior m | Frontera inferior m | | | | | |
| 48.00 | 49.00 | 30.94 | 1.53 | 13.5 | 29.0 | 3.0 |

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

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

Por lo anterior, para fines de especificación del bombeo durante la construcción, se recomienda mantener abatido el nivel del agua un mínimo de 3.0 m por debajo de la profundidad del fondo durante todo el proceso de excavación.

3.6.1 Diseño de pozos de bombeo

El gasto de de bombeo se determina mediante la siguiente expresión:

$$q = \left(\frac{f k_0 (d_0 + y_0) + 2f \sum k_{di} d_i}{\ln \frac{R_0}{r_0}} \right) S_0 \tag{13}$$

- donde:
- k_0 permeabilidad media, cm/s
 - S_0 nivel dinámico de pozos, cm
 - $\sum k_{di} d_i$ sumatoria del i-ésimo estrato con su k-esima permeabilidad
 - R_0 radio de influencia del pozo, cm
 - r_0 radio del pozo de bombeo, cm
 - d_0 nivel estático, cm
 - y_0 distancia entre el nivel dinámico y el primer estrato

Considerando una distancia entre pozos de 8.0 m, un diámetro de pozo de 12” y las permeabilidades que se indican en la Tabla 10, se obtuvieron las curvas de abatimiento que se muestran en la Figura 24, con un abatimiento de 2.8 m debajo del nivel máximo de excavación.

Tabla 10. Permeabilidad del modelo geotécnico

| Estrato | Espesor d_i cm | Permeabilidad k_i cm/s |
|---------|---------------------|-----------------------------|
| A | 260 | 1×10^{-3} |
| B | 2520 | 1×10^{-8} |
| C | 180 | 1×10^{-3} |
| D | 940 | 1×10^{-4} |
| E | 800 | 3×10^{-3} |
| F | 5300 | 1×10^{-5} |

Métodos de bombeo.

- a) *Pozos de bombeo con puntas eectoras:* consiste en la excavación con máquina rotatoria usando agua como fluido de perforación, el diámetro usual es de 25 cm, posteriormente se coloca un ademe ranurado de tubo PVC de 7.5 a 10 cm de diámetro interior, el espacio anular entre el ademe y el pozo se rellena con gravilla en toda la longitud el pozo. Dentro del ademe se colocan bombas tipo eector con tubos de inyección de 13 mm de diámetro y salida de 19 mm (Figura 22).

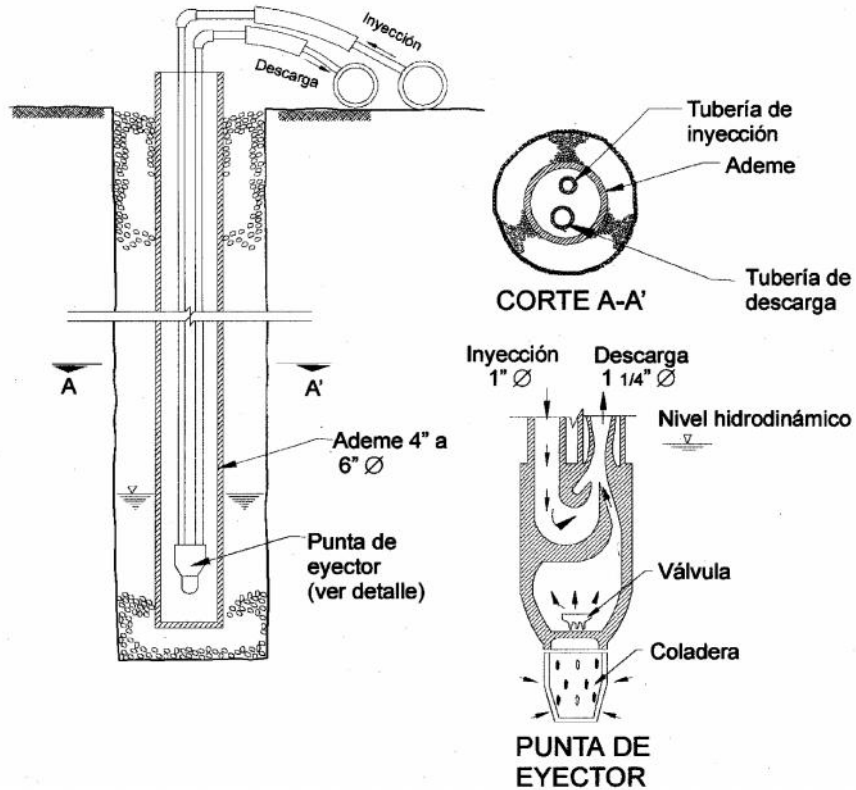


Figura 22. Características de un pozo con puntas eectoras

- b) *Pozo de bombeo profundo:* Consiste en un pozo con un filtro y ademe ranurado al que se le instala una bomba sumergible (Figura 25).

Elección del sistema de bombeo.

En la Figura 25 se muestra el arreglo mediante 12 pozos de bombeo profundo que van a extraer un caudal de 5 lps cada uno.

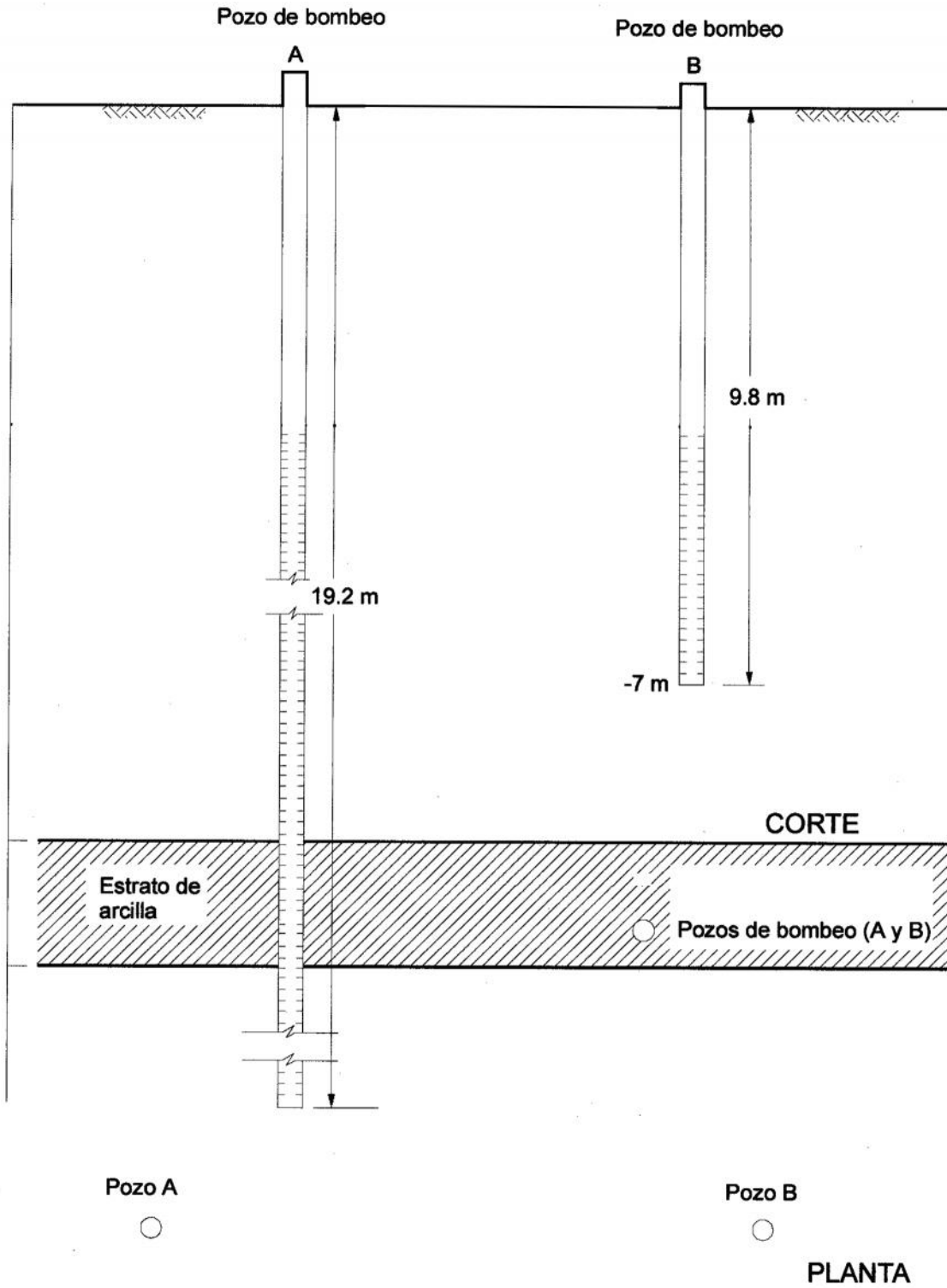


Figura 23. Esquema de pozo de bombeo profundo

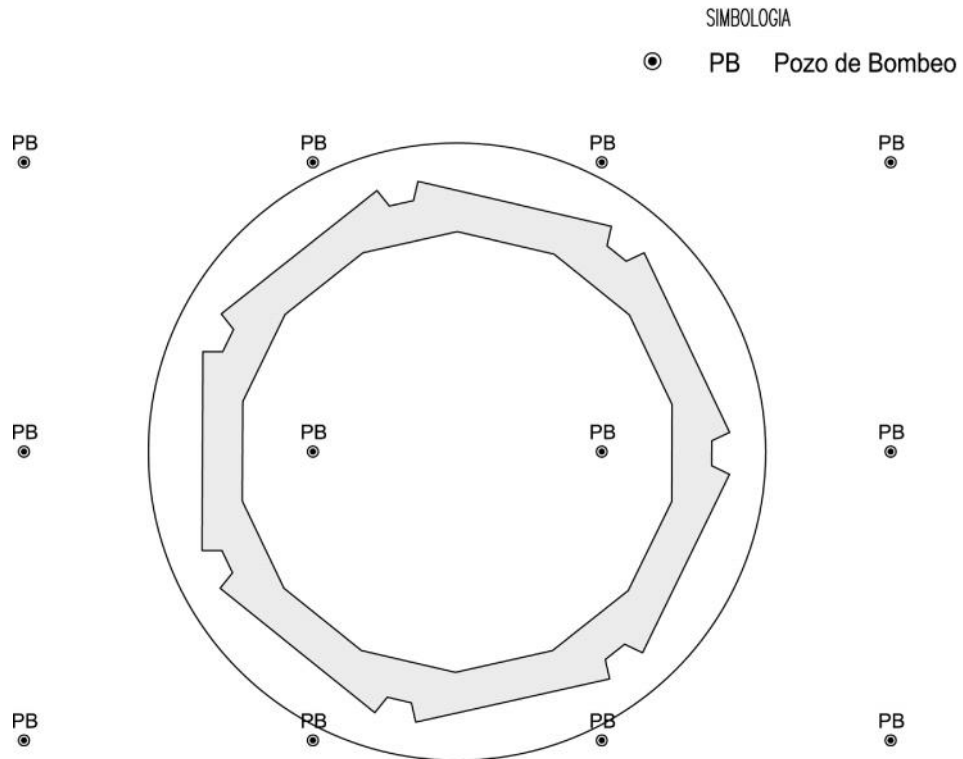
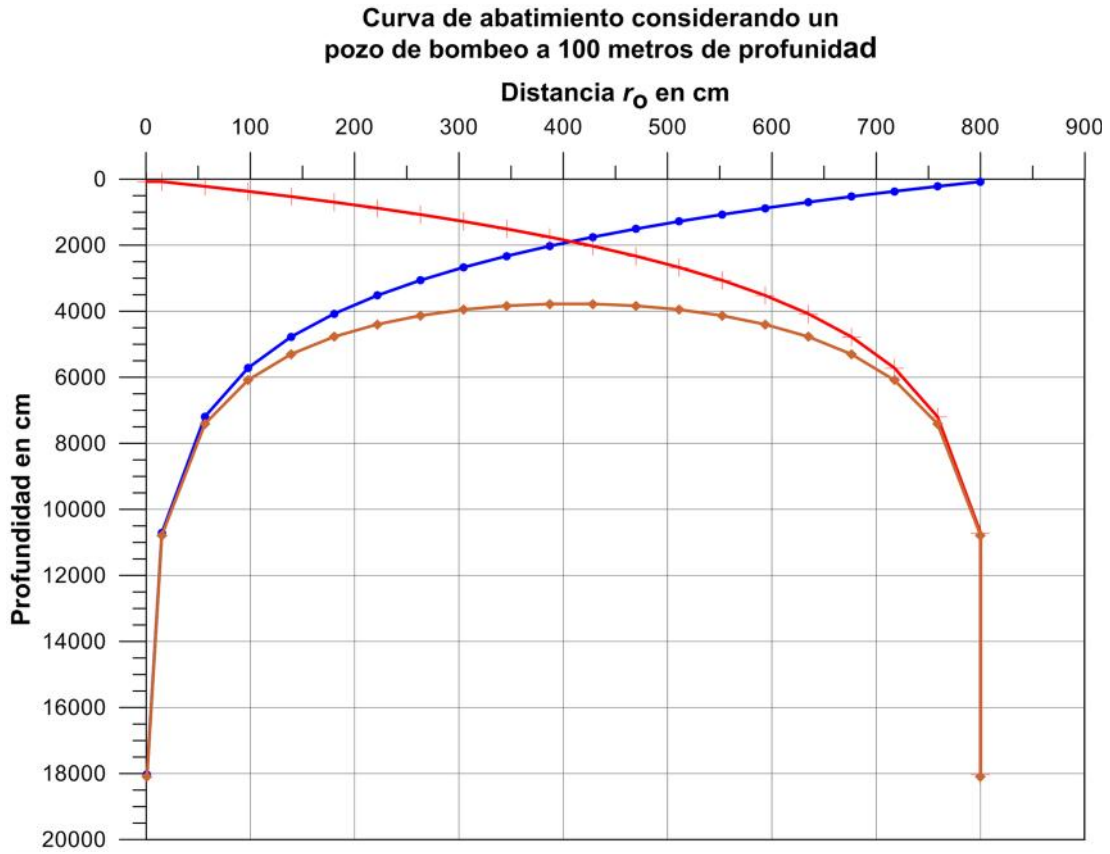


Figura 25. Arreglo de los pozos de bombeo

3.7 Fricción negativa

En caso de que el abatimiento piezométrico afecte los estratos superficiales podría generarse fricción negativa sobre el fuste de la lumbrera. Considerando que los materiales deformables se localizan hasta 39.0 m de profundidad, la fricción negativa a desarrollarse se calcula con la siguiente ecuación (Referencia 7):

$$FN = \pi D \cdot K_{\phi} \cdot \int \sigma_0 \cdot dz_i \quad (14)$$

donde: FN fricción negativa sobre la lumbrera
 D diámetro exterior de la lumbrera
 K_w coeficiente de empuje a largo plazo del estrato i , $K_{\phi} \approx 0.3$
 $\int \sigma_0 dz_i$ área del diagrama de esfuerzos verticales efectivos (para abatimiento total) en la masa de suelo

Aplicando la expresión (14) y considerando un área del diagrama de esfuerzos efectivos de 605.5 m² obtenido con la Figura 13, se obtiene:

$$FN = f \cdot D \cdot 0.3 \cdot 605.5 = 570.67 \cdot D$$

Por lo tanto, la sección más crítica del fuste de la lumbrera corresponde a la profundidad de 35 m, donde se tendrá un incremento de carga máximo de 8,560 ton para un $D = 15$ m y que deberá tomarse en cuenta en el diseño estructural.

3.8 Estabilidad de la excavación para muro Milán

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

Lodo bentonítico. El análisis de estabilidad de la zanja para el muro Milán durante la excavación, consiste en confirmar que la densidad del lodo sea la adecuada con el fin de que la presión que ejerce la columna de lodo bentonítico sobre las paredes de la excavación impida que se genere la superficie de falla; se deberá cumplir la siguiente condición:

$$\text{Resistencia confinada del suelo, } \tau_1 > \text{Esfuerzo efectivo vertical del suelo, } \tau'$$

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

$$\sigma_1 = \sigma_3 \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\phi}{2} \right) + 2c \tan \left(45^\circ + \frac{\phi}{2} \right) \quad (15)$$

donde: c resistencia al corte no drenada media del estrato representativo
 τ_3 esfuerzo efectivo del lodo bentonítico (para la revisión de la zanja con concreto corresponde al esfuerzo efectivo vertical del suelo)

Los resultados se enlistan en la Tabla 11 y con estos datos se dibujaron los diagramas de la Figura 26, en la cual se observa que si se cumple que la resistencia confinada del suelo es mayor que el esfuerzo vertical efectivo (se usó un valor de densidad de lodo bentonítico de 1.07 ton/m^3), pero en general el factor de seguridad calculado da por debajo del mínimo recomendable de 1.95.

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

$$\text{Presión efectiva del concreto, } \uparrow_c < \text{Resistencia confinada del suelo, } \uparrow_1$$

Los resultados se muestran en la Tabla 12 con los que se dibujaron los diagramas de la Figura 27, que muestra gráficamente la variación del esfuerzo efectivo ejercido por el concreto con la profundidad, junto con la resistencia confinada del suelo; al comparar ambas gráficas se observa que la desigualdad sólo se cumple entre los 0.0 y 6.0 m, y de 29.0 a 35.0 m de profundidad, donde la resistencia confinada del suelo es mayor que la presión efectivo del concreto. Por lo tanto, donde no se cumple la desigualdad, el concreto provocará un ensanchamiento de la zanja y se reflejará en el muro como un incremento en su espesor.

Tabla 11. Estabilidad de la zanja con lodo bentonítico

| ESTRATO | Prof m | c t/m ² | ϕ ° | Esfuerzo efectivo t/m ² | Presión del lodo t/m ² | Presión de poro t/m ² | $\tan^2(45+\phi/2)$ | Resistencia confinada del suelo t/m ² | FS |
|------------|-----------|-----------------------|-------------|--|---|--|---------------------|---|------|
| Superficie | 0 | | | 0 | | 0.00 | | 0.0 | |
| A | 2.6 | 4 | 25 | 1.67 | 2.78 | 1.97 | 2.4 | 8.81 | 5.28 |
| B1 | 9.7 | 1.6 | 0 | 3.3 | 10.38 | 9.07 | 1 | 4.47 | 1.35 |
| B2 | 19.0 | 2.7 | 0 | 5.81 | 20.33 | 18.28 | 1 | 7.45 | 1.28 |
| B3 | 23.5 | 4.8 | 0 | 7.26 | 25.15 | 22.78 | 1 | 11.97 | 1.65 |
| B4 | 27.8 | 4.8 | 0 | 13.24 | 29.75 | 22.38 | 1 | 16.97 | 1.28 |
| C | 29.6 | 15.0 | 25 | 16.18 | 31.67 | 22.32 | 2.4 | 39.35 | 2.43 |
| D1 | 35.0 | 9.1 | 0 | 23.97 | 37.45 | 22.14 | 1 | 33.51 | 1.40 |
| D2 | 39. | 9.1 | 0 | 29.75 | 41.73 | 22 | 1 | 37.93 | 1.27 |
| E | 47.0 | 12.5 | 0 | 35.49 | 50.29 | 29.46 | 1 | 45.83 | 1.29 |
| F | 48.0 | 8.3 | 0 | 35.90 | 51.36 | 30.45 | 1 | 37.51 | 1.04 |

Tabla 12. Estabilidad de la zanja con concreto fresco

| ESTRATO | Prof. m | c t/m ² | ϕ ° | Esfuerzo efectivo t/m ² | Presión de poro t/m ² | $\tan^2(45+\phi/2)$ | Presión efectiva concreto t/m ² | Resistencia confinada del suelo t/m ² | FS |
|------------|------------|-----------------------|-------------|--|--|---------------------|---|---|------|
| Superficie | 0 | | | 0 | 0.0 | | | 0.0 | |
| A | 2.6 | 4 | 25 | 1.67 | 1.97 | 2.4 | 6.24 | 12.27 | 1.97 |
| B1 | 9.7 | 1.6 | 0 | 3.3 | 9.07 | 1 | 23.28 | 17.37 | 0.75 |
| B2 | 19.0 | 2.7 | 0 | 5.81 | 18.28 | 1 | 45.6 | 32.72 | 0.72 |
| B3 | 23.5 | 4.8 | 0 | 7.26 | 22.78 | 1 | 56.4 | 43.22 | 0.77 |
| B4 | 27.8 | 4.8 | 0 | 13.24 | 22.38 | 1 | 66.72 | 53.94 | 0.81 |
| C | 29.6 | 15.0 | 25 | 16.18 | 22.32 | 2.4 | 71.04 | 188.8 | 2.66 |
| D1 | 35.0 | 9.1 | 0 | 23.97 | 22.14 | 1 | 84.0 | 80.06 | 0.95 |
| D2 | 39.0 | 9.1 | 0 | 29.75 | 22 | 1 | 93.6 | 89.80 | 0.96 |
| E | 47.0 | 12.5 | 0 | 35.49 | 29.46 | 1 | 112.8 | 108.34 | 0.96 |
| F | 48.0 | 8.3 | 0 | 35.90 | 30.45 | 1 | 115.2 | 101.35 | 0.88 |

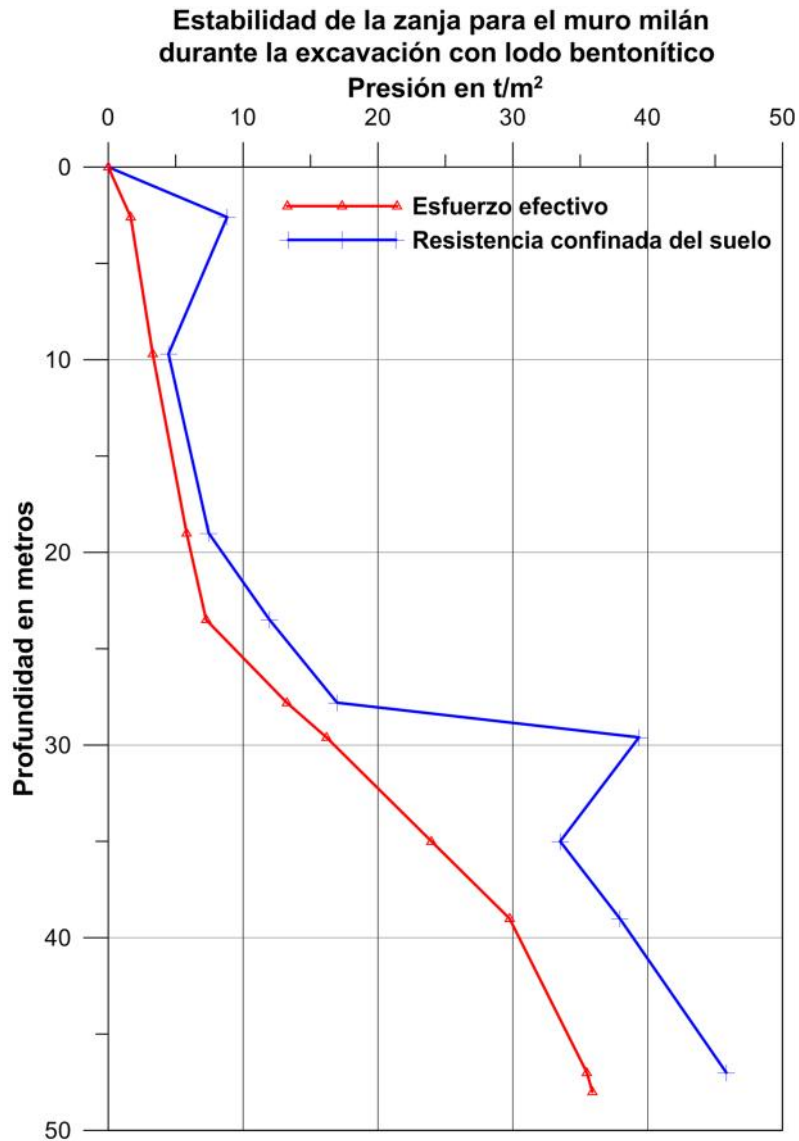


Figura 26. Presiones y esfuerzos inducidos en la zanja por el lodo bentonítico

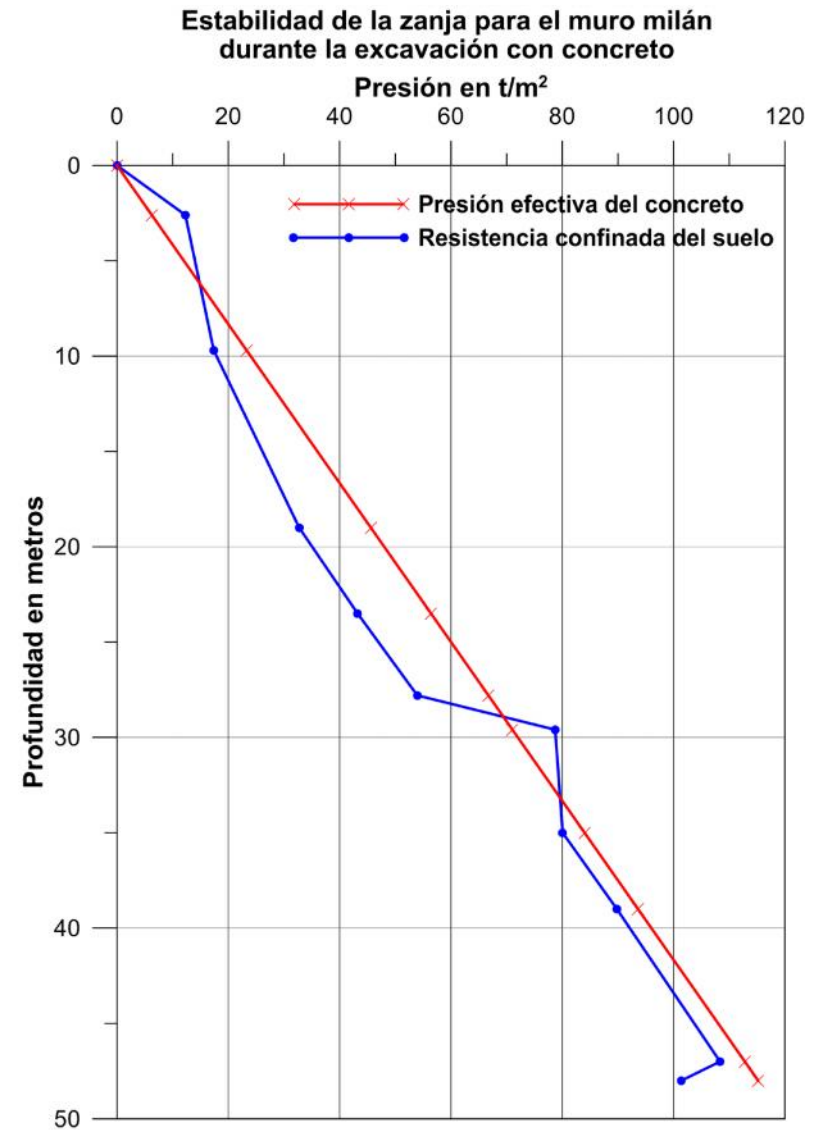


Figura 27. Presiones y esfuerzos inducidos en la zanja por el concreto fluido

3.9 Análisis a la salida del escudo

El análisis de estabilidad de la conexión de la lumbrera hacia el túnel se realiza revisando la estabilidad del frente de la excavación resultante de demoler el revestimiento de la lumbrera para permitir el paso de la tunelera, ver Figura 28.

3.9.1 Criterio de Tamez

En la Figura 28 se observa el mecanismo simplificado para analizar el equilibrio de la masa de suelo que rodea al frente de un túnel propuesto por Tamez.

$$(FS)_{esc} = \frac{2 \cdot s_{m2} \cdot \frac{Z_d}{A} \cdot (1 + \sqrt{K_p}) + 2.7 \cdot c_1 \cdot \sqrt{K_p}}{\frac{\chi_1 \cdot A}{3} + \chi_2 \cdot H + q_s + \Delta q_s} \quad (16)$$

donde:

$$s_{m2} = K_f \cdot c_2 + 0.5 \cdot [\chi_2 \cdot (H - Z_d) + q] \cdot tgW_2 \quad (17)$$

$$K_f = \frac{1 - \text{sen}^2 W_2}{1 + \text{sen}^2 W_2} \quad (18)$$

$$q = 2.7 \cdot c_1 \cdot \sqrt{K_p} - 0.5 \cdot \chi_1 \cdot A \quad (19)$$

$$K_p = tg^2 \left(45^\circ + \frac{W_1}{2} \right) \quad (20)$$

| | | |
|--------|------------------|--|
| donde: | Z_d | altura de descarga |
| | c_1, c_2 | cohesión del suelo en los prismas 1 y 2, respectivamente |
| | χ_1, χ_2 | peso volumétrico del suelo en los prismas 1 y 2, respectivamente |
| | W_1, W_2 | ángulo de fricción interna del suelo en los prismas 1 y 2, respectivamente |
| | A | avance sin soporte |
| | H | profundidad de análisis |
| | q_s | sobrecarga en la superficie |
| | Δq_s | incremento de la sobrecarga debido al revestimiento |
| | s_{m2} | resistencia media en las caras del prisma 2 |
| | q | capacidad de carga neta del prisma 1 (valor límite $q = \chi \cdot H$) |
| | K_f | factor de fricción |
| | K_p | coeficiente de empuje pasivo |

Considerando A = diámetro del túnel, la expresión del factor de seguridad para un túnel profundo en suelos puramente cohesivos se simplifica como sigue:

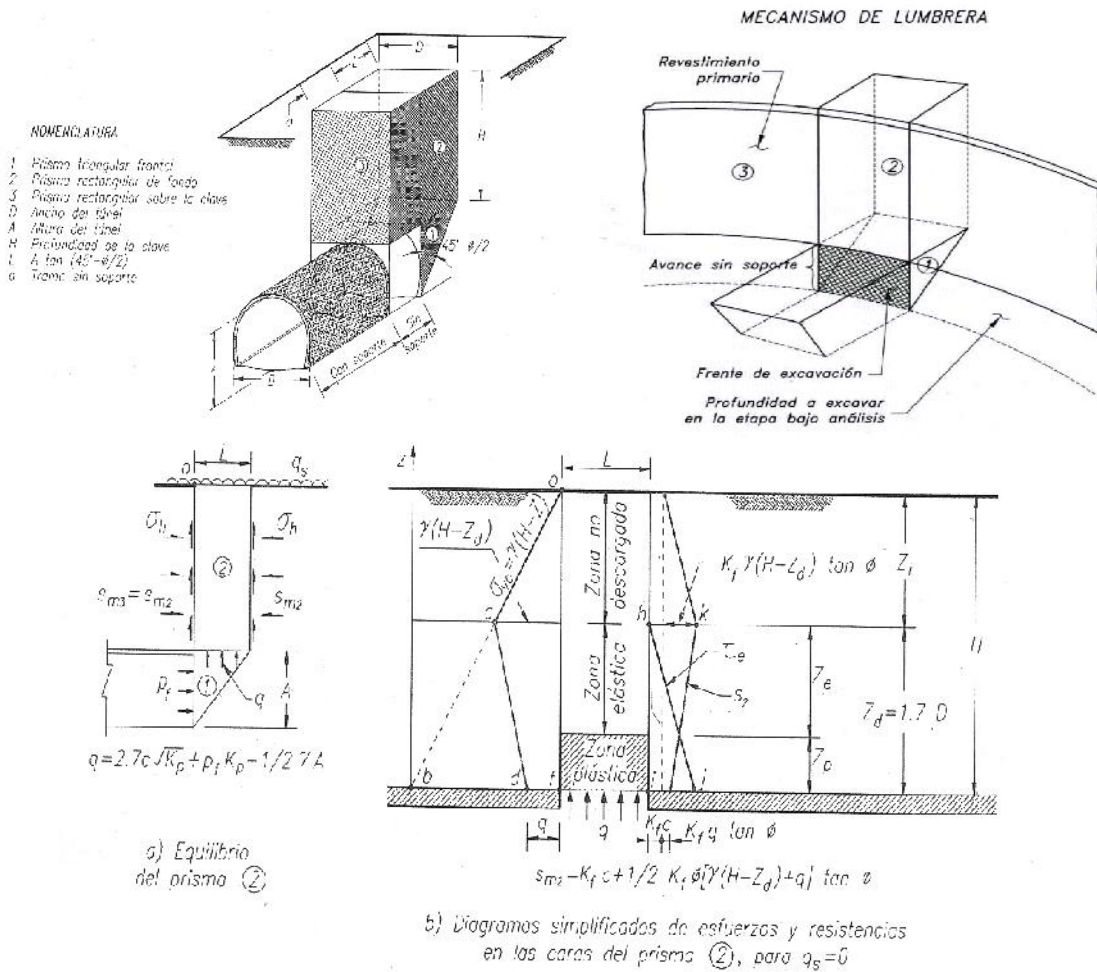


Figura 28. Mecanismo simplificado de falla de frente de un túnel

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

Sustituyendo los valores correspondientes se obtiene:

$$(FS)_{esc} = \frac{4 \times 1.7 \times 60 + 2.7 \times 90}{\frac{12.9 \times 7.5}{3} + 11.7 \times (32.63 - 7.5) + 30} = 1.83$$

Este valor es menor al valor mínimo de estabilidad recomendable de 2 (Referencia 8).

3.10 Comportamiento ante descarga permanente

El comportamiento de estructuras sobrecompensadas ha demostrado que la expansión continúa a través de varios años después de concluida la construcción, con velocidad decreciente en el tiempo.

3.10.1 Distribución de esfuerzos

La ecuación de Midlin para el cálculo del esfuerzo vertical \dagger_{z_0} al centro, actuando dentro de la masa de suelo (Referencia 9) ha sido integrada por Nishida (1966) para un área circular (Figura 29) mediante la siguiente expresión:

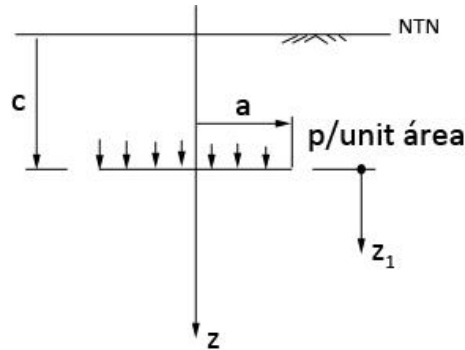


Figura 29. Distribución de esfuerzos en un área circular dentro de la masa de suelo

$$\dagger_{z_0} = \frac{p}{4(1-\epsilon)} \left[(1-2\epsilon)(z-c) \left\{ \frac{1}{\sqrt{a^2+(z+c)^2}} - \frac{1}{\sqrt{a^2+(z-c)^2}} + \frac{1}{z-c} - \frac{1}{z+c} \right\} - \left\{ \left(\frac{z+c}{\sqrt{a^2+(z+c)^2}} \right)^3 - 1 \right\} \cdot \frac{3(3-4\epsilon)z(z+c)^2 - 3c(z+c)(5z-c)}{3(z+c)^3} + 1 - \left(\frac{z-c}{\sqrt{a^2+(z-c)^2}} \right)^3 + \frac{6cz}{(z+c)^2} \cdot \left\{ 1 - \left(\frac{z+c}{\sqrt{a^2+(z-c)^2}} \right)^5 \right\} \right] \quad (22)$$

donde:

- p esfuerzo, t/m²
- ν módulo de Poisson, 0.45
- c profundidad de desplante de la lumbrera, 35 m
- a radio de la lumbrera, 7.5 m
- z profundidad de análisis

En la Figura 30 se muestran los esfuerzos inducidos en la masa del suelo con base en la expresión (22), tomando en cuenta las siguientes consideraciones.

- Peso volumétrico promedio: 1.41 t/m³
- Profundidad de desplante de la lumbrera: 35.0 m
- Esfuerzo de descarga:

$$\dagger = \gamma D_f = 1.41 \frac{\text{t}}{\text{m}^3} \times 35 \text{ m} = 49.35 \frac{\text{t}}{\text{m}^2} \quad (23)$$

- Presión neta transmitida al terreno por la lumbrera construida (Tabla 13):
- Radio de la lumbrera: 7.5 m

Tabla 13. Presión neta

| | | |
|------------------------------------|--------------|------------------------|
| Diámetro interior | 13.00 | m |
| Profundidad de desplante | 35.0 | m |
| Espesor de muros | 1.00 | m |
| Diámetro exterior | 15.00 | m |
| Espesor de losa de fondo | 2.50 | m |
| Tirante de agua máximo considerado | 7.80 | m |
| Peso volumétrico del concreto | 2.40 | t/m ³ |
| Peso volumétrico del agua | 1.00 | t/m ³ |
| Peso de concreto | 5,219.25 | t |
| Peso de agua | 1,035.31 | t |
| Peso total de la lumbrera | 6,254.57 | t |
| Área de la lumbrera | 176.71 | m ² |
| Presión neta | 35.39 | t/m² |

Como se observa en la Figura 30, se aprecia que a la profundidad de 35.0 m se define un valor de esfuerzo de descarga igual a 49.35 t/m² y la presión provocada por la construcción de la lumbrera es de 35.39 t/m², por lo que se presentó una expansión al momento de construir dicha lumbrera.

Observamos también que el diferencial del decremento de la distribución del esfuerzo con respecto de la profundidad es de 13.96 t/m² al nivel de desplante y disminuye prácticamente a cero a la profundidad de 40.60 m.

Por lo cual, se comprueba que a mayor profundidad el valor de la distribución del esfuerzo vertical no es relevante en un análisis esfuerzo-deformación, siendo la profundidad de 41 m la adecuada para el cálculo de movimientos verticales.

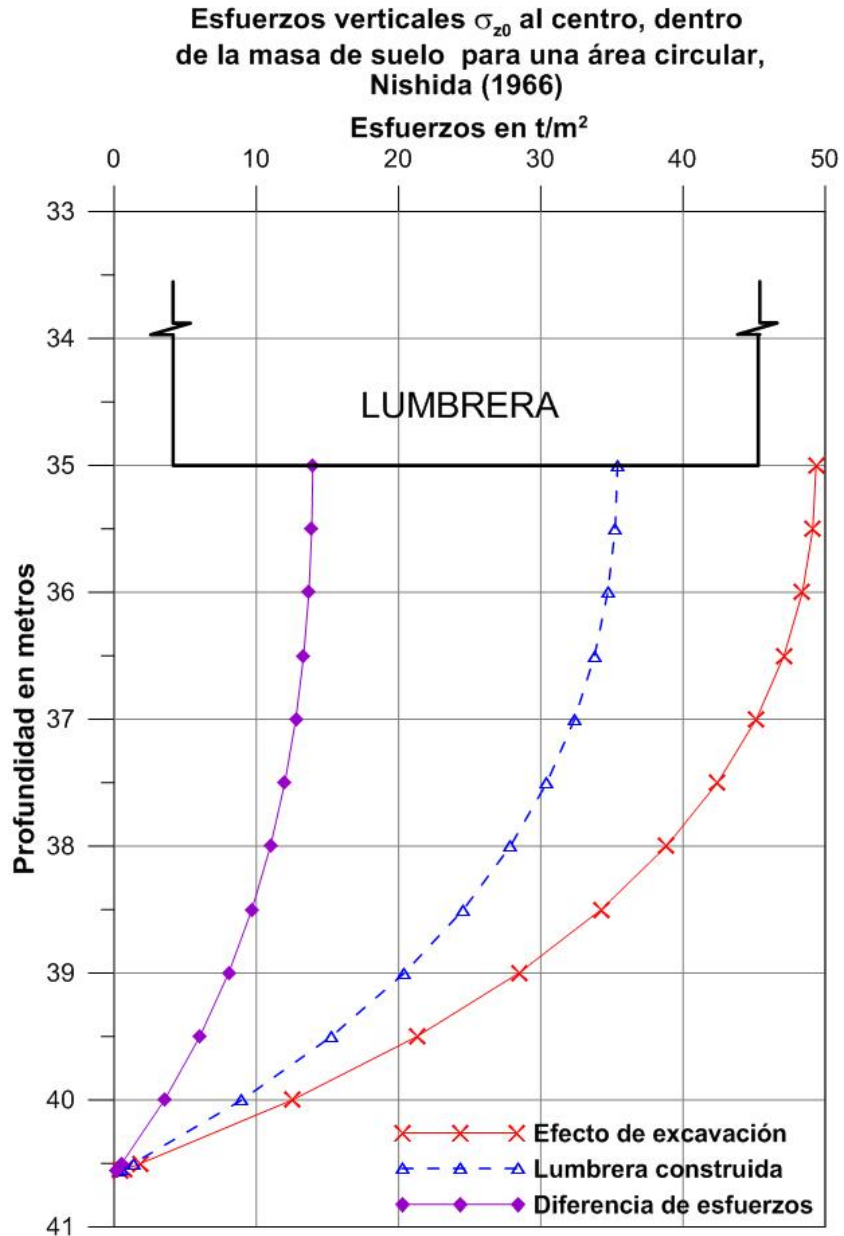


Figura 30. Distribución de esfuerzos verticales, Nishida (1966)

3.10.2 Análisis de movimientos verticales

Se deben estimar las expansiones y asentamientos en cada una de las etapas constructivas del cajón y durante su vida útil; en el cálculo se analizarán las siguientes deformaciones:

1) Asentamiento por bombeo previo

Cuando se emplea el bombeo por gravedad para eliminar la subpresión en una capa de arena bajo el fondo de la excavación, el asentamiento puede estimarse considerando que el abatimiento del nivel freático se presenta sólo en la zona a excavar. El asentamiento por bombeo previo puede estimarse con la siguiente expresión:

$$u_b = m_v \cdot \alpha_w h \cdot B \cdot F_f \cdot U \quad (24)$$

donde: m_v módulo de compresibilidad volumétrica
 B ancho de la cimentación, igual al diámetro de la lumbrera, 15 m
 $\alpha_w h$ abatimiento de la presión piezométrica, 30.44 t/m²
 F_f factor de forma, adimensional
 U grado de consolidación alcanzado durante el bombeo, %

Se obtiene un asentamiento por bombeo previo de $u_b = 17$ cm.

2) Expansión asociada a la excavación.

Es indispensable revisar las condiciones a largo plazo para verificar si existirá una descarga neta, se analizará la expansión provocada por el alivio de esfuerzo al realizar la excavación dada por la siguiente expresión:

$$u_e = M_e \Delta \uparrow_{exc} H \quad (25)$$

$$M_e = \frac{1}{E} \quad (26)$$

donde M_e módulo elástico, cm²/kg
 $\Delta \uparrow_{exc}$ decremento de esfuerzos, kg/cm²
 H espesor del estrato considerado, 500cm
 E módulo de elasticidad, 50 kg/cm²

La expansión provocada por el alivio de esfuerzo al realizar la excavación resultó de $u_{z0exp} = 45.0$ cm.

3) Asentamiento por recompresión.

Los desplazamientos verticales al centro dentro de una masa de suelo para un área circular se evalúan con la expresión siguiente (Referencia 9):

$$u_{z0} = \frac{p(1+\epsilon)}{4E(1-\epsilon)} \left[(3-4\epsilon) \left\{ \sqrt{a^2 + (z-c)^2} - (z-c) \right\} + (5-12\epsilon + 8\epsilon^2) \left\{ \sqrt{a^2 + (z+c)^2} - (z+c) \right\} + \right. \\ \left. (z-c) - \frac{(z-c)^2}{\sqrt{a^2 + (z-c)^2}} + \frac{(3-4\epsilon)(z+c)^2 - 2cz}{z+c} - \frac{2cz(z+c)^2}{\left(\sqrt{a^2 + (z+c)^2} \right)^3} + \frac{2cz}{z+c} - \right. \\ \left. \frac{(3-4\epsilon)(z+c)^2 - 2cz}{\sqrt{a^2 + (z+c)^2}} \right] \quad (27)$$

donde: E módulo de elasticidad, 500 t/m²

El asentamiento por recompresión al colocar la lumbrera resulta de $\dots_{z0rec} = 17.0 \text{ cm}$.

Para el análisis de movimientos verticales emplearemos la siguiente convención:

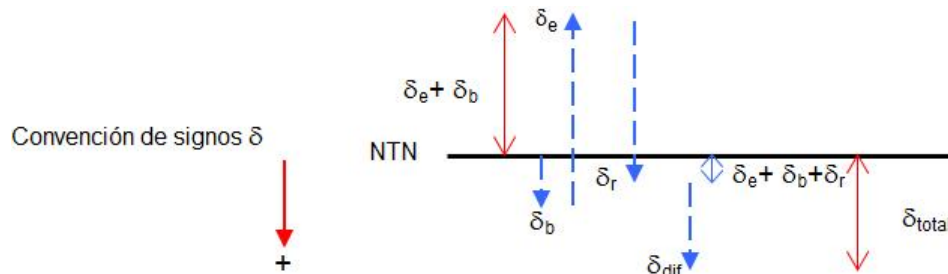


Figura 31. Convención de signos de movimientos verticales

Con base en la Figura 31 y con los resultados obtenidos se concluye que se tiene una expansión al final de la construcción de la lumbrera de **11 cm**.

3.11 Análisis sísmico

3.11.1 Método riguroso

Para el diseño sísmico de lumbreras es necesario considerar la modificación del movimiento inducido en el depósito de suelo por la presencia de la estructura. Esta condición obliga a considerar tanto los efectos de la interacción cinemática como la interacción inercial.

Para el análisis riguroso de la respuesta sísmica de lumbreras en un medio estratificado es necesario resolver un problema tridimensional que considere explícitamente los efectos de la profundidad de desplante y la estratigrafía del sitio. En el modelo se supone una placa rígida en superficie, rugosa y carente de masa, sujeta a vibraciones torsionales, verticales y horizontales. Este elemento representa la parte superior, o cabeza, de la lumbrera. El medio corresponde a un depósito de suelo estratificado horizontalmente, apoyado sobre una base fija. El dominio de análisis se divide en una región interior y otra exterior. La primera, bajo la cabeza, representa el cuerpo de la lumbrera mediante la asignación de propiedades congruentes con los materiales que lo constituyen; en el caso de lumbreras flotantes, bajo su losa de fondo se considera la columna de suelo de soporte. La segunda región corresponde a la zona que envuelve a la estructura, con condiciones de frontera libre en la superficie y fija en la base (Figura 32).

Con este procedimiento se determinan las fuerzas cortantes y momentos flexionantes que actúan a lo largo de la profundidad de la lumbrera.

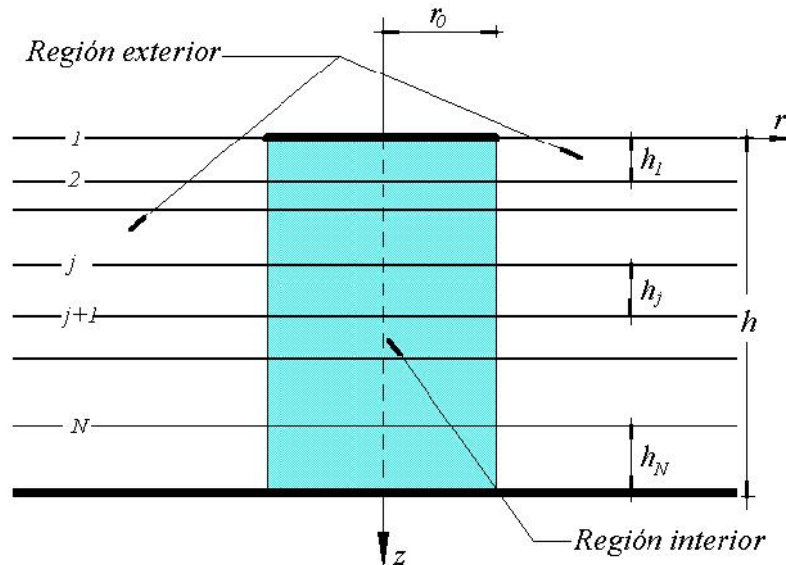


Figura 32. Dominio de análisis

3.11.2 Método simplificado

El método riguroso de análisis para la revisión sísmica de las lumbreras descrito en el inciso anterior se puede simplificar considerando modelos que consideren una o dos capas apoyadas sobre una base rígida, estas soluciones se derivan de los resultados obtenidos con el método riguroso. En nuestro caso utilizaremos este método simplificado.

Con base en la experiencia que del análisis sísmico de lumbreras, tenemos un procedimiento simplificado para estimar las acciones dinámicas en este tipo de elementos considerando su interacción con el suelo. Este método de análisis se fundamenta en el cálculo de los valores estáticos del cortante y momento, multiplicados por factores de amplificación que consideran el efecto dinámico. Para su aplicación se requiere del conocimiento de la aceleración máxima del terreno en la base del depósito de suelo.

3.11.2.1 Método simplificado con el modelo geotécnico de dos capas

Con base en la estratigrafía encontrada, el modelo geotécnico de dos capas se adecua más a nuestro problema (ver Figura 33), el estrato superior representa los depósitos superficiales, donde se presenta la mayor amplificación de la respuesta sísmica y el estrato inferior representa los depósitos profundos. Los casos estudiados buscan abarcar las mayores combinaciones geométricas y materiales de sistemas suelo-lumbrera.

Los parámetros del sistema que se han fijado constantes que se muestran a continuación:

- Lumbrera: $v_o = 0.2, \zeta_o = 0.05$
- Depósitos superficiales: $v_1 = 0.45, \zeta_1 = 0.1$
- Depósitos profundos: $v_2 = 0.3, \zeta_2 = 0.08$

Los parámetros investigados son la relación de esbeltez H_o/r_o y los contrastes de rigidez β_o/β_1 (estructura/suelo) y β_1/β_2 (suelo/basamento). Los valores considerados para estos parámetros se indican en la Tabla 14. En todos los casos analizados se asume que $\rho_o/\rho_1 = 1.5$ y $\rho_1/\rho_2 = 0.8$.

Para el desarrollo del método simplificado, se calcularon los valores estáticos de la fuerza cortante Q_o y el momento flexionante M_o a diferente profundidad, así como los valores medios de cortante y momento máximos debidos a sismos de diseño simulados. El cociente entre ellos permite definir factores de amplificación que consideran el efecto dinámico.

PROCEDIMIENTOS PARA EL CÁLCULO DE CORTANTES Y MOMENTOS:

Para calcular la distribución con la profundidad de la fuerza cortante y el momento flexionante que actúan sobre lumbreras, deben seguirse los pasos que se describen a continuación.

1. Establecer la aceleración máxima del terreno en roca para los sismos de diseño considerados.

La aceleración máxima del terreno en la base del depósito del suelo se define para dos niveles de diseño: 1) sismo frecuente con 10% de probabilidad de excedencia en 5 años de periodo de exposición y 2) sismo raro con 10% de probabilidad de excedencia en 50 años de periodo de exposición.

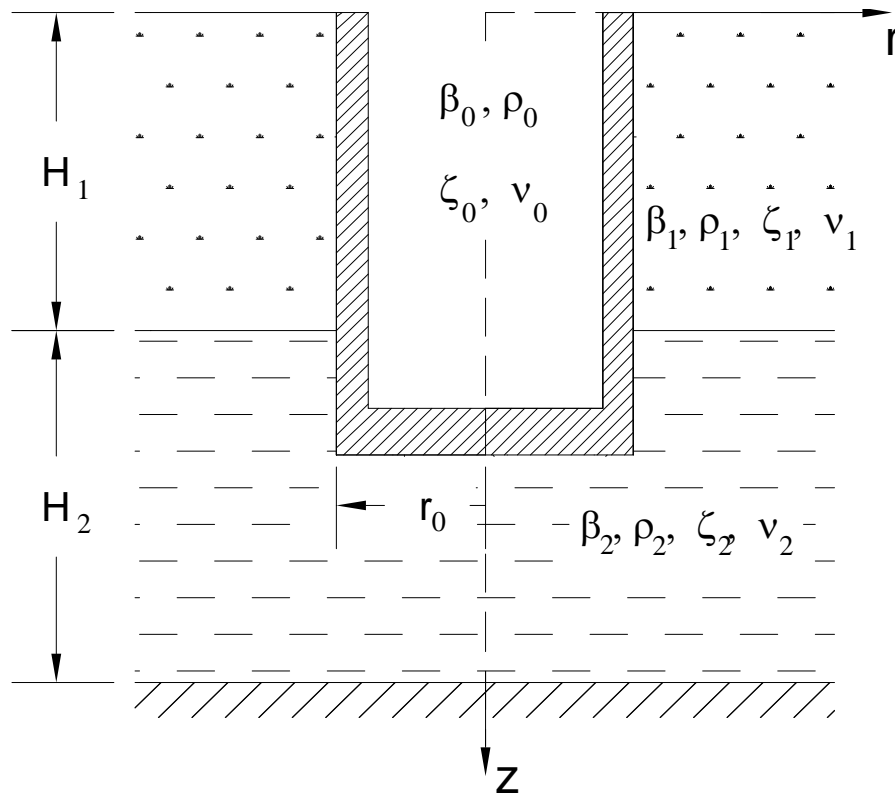


Figura 33. Sistema suelo-lumbrera para análisis de interacción dinámica, modelo geotécnico de dos capas

| Caso | | H_o/r_o | H_1/r_o | H_2/r_o | β_o/β_1 | β_1/β_2 |
|------|---|------------|-----------|-----------|-------------------|-------------------|
| A | 1 | 6 (48/8) | 4 (32/8) | 3 (24/8) | 4.5 (2250/500) | 0.4 (500/1250) |
| | 2 | | | | 9 (2250/250) | 0.333 (250/750) |
| | 3 | | | | 18 (2250/125) | 0.25 (125/500) |
| B | 1 | 9 (72/8) | 4 (32/8) | 6 (48/8) | 4.5 (2250/500) | 0.4 (500/1250) |
| | 2 | | | | 9 (2250/250) | 0.333 (250/750) |
| | 3 | | | | 18 (2250/125) | 0.25 (125/500) |
| C | 1 | 12 (96/8) | 4 (32/8) | 9 (72/8) | 4.5 (2250/500) | 0.4 (500/1250) |
| | 2 | | | | 9 (2250/250) | 0.333 (250/750) |
| | 3 | | | | 18 (2250/125) | 0.25 (125/500) |
| D | 1 | 15 (120/8) | 4 (32/8) | 12 (96/8) | 4.5 (2250/500) | 0.4 (500/1250) |
| | 2 | | | | 9 (2250/250) | 0.333 (250/750) |
| | 3 | | | | 18 (2250/125) | 0.25 (125/500) |

Tabla 14. Parámetros de los sistemas investigados

El periodo de recurrencia para la acción sísmica que tiene una probabilidad de excedencia p en un tiempo t es:

$$T_r = \frac{t}{e^p - 1} \tag{28}$$

Así, los periodos de retorno para los sismos de diseño considerados son:

$$T_r^{(1)} = \frac{5}{e^{0.1} - 1} = 47.5 \text{ años}$$

$$T_r^{(2)} = \frac{50}{e^{0.1} - 1} = 475 \text{ años}$$

El sismo de 47.5 años es para la condición temporal donde el comportamiento de la lumbrera sin revestimiento estructural es elástico ($Q = 1$) y el sismo de 475 años es para la condición definitiva donde el comportamiento de la lumbrera con revestimiento estructural es inelástico ($Q = 2$). Los espectros de respuesta para estos sismos de diseño se muestran en la Figura 34.

La aceleración que se espera para el sismo con tiempo de retorno $T_r = 47.5$ años y $T_r = 475$ años es $\ddot{x}_g = 39.7 \text{ m/s}^2$ y $\ddot{x}_g = 91.4 \text{ m/s}^2$, respectivamente.

$$\ddot{x}_g(47.5) = 39.7 \text{ cm/s}^2 \qquad \frac{\ddot{x}_g(47.5)}{g} = 0.040 \tag{29}$$

$$\ddot{x}_g(475) = 91.4 \text{ cm/s}^2 \qquad \frac{\ddot{x}_g(475)}{g} = 0.093 \qquad (30)$$

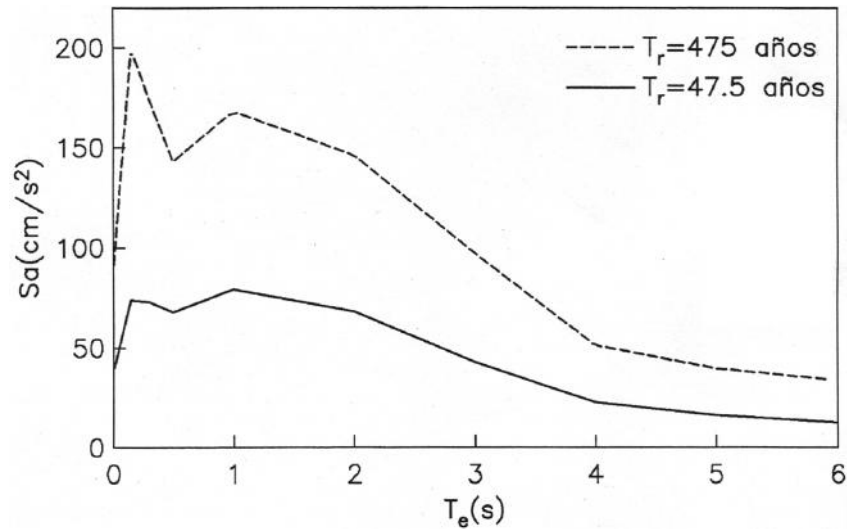


Figura 34. Espectros de peligro uniforme en roca para el Valle de México

- Calcular la velocidad de cortante y la densidad promedias del subsuelo hasta una profundidad $H_1 = 4r_o$, utilizando la expresión:

$$S_{1, \dots, 1} = \frac{H_1}{\sum_n \frac{h_n}{S_n}, \frac{h_n}{\dots_n}} \qquad (31)$$

donde S_n es la velocidad de corte, \dots_n la densidad y h_n el espesor del n-ésimo estrato en los depósitos superficiales.

Datos de la lumbrera:

Altura de la lumbrera $H_o = 35.0$ m

Radio de la lumbrera $r_o = 7.5$ m

Profundidad del estrato $H_1 = 4 \times 7.5 = 30$ m

Con base en los estratos del suelo que tenemos asumiremos $H_1 = 29.5$ m.

Se puede correlacionar la velocidad de onda de corte de la arcilla de la Ciudad de México con su resistencia de punta en una prueba de cono eléctrico (Referencia 9) mediante la siguiente expresión:

$$S = y \sqrt{\frac{q_c}{N_{kh} \gamma_s}} \quad (32)$$

Donde: S velocidad de onda de corte, m/s
 q_c resistencia de punta, t/m²
 γ_s peso volumétrico del suelo, t/m³
 N_{kh} se obtiene de la Tabla 15
 y se obtiene de Tabla 16

Tabla 15. Valores sugeridos de N_{kh}

| Tipo de suelo | Valores de N_{kh} | | |
|--|---------------------|-------|--------|
| | Máximo | Medio | Mínimo |
| Arcilla del lago de Texcoco preconsolidado y virgen | 14.0 | 9.5 | 6.7 |
| Arcillas del lago Xochimilco-Chalco | 14.0 | 9.9 | 7.0 |
| Suelos areno-limosos de las capas duras en todo el valle | 16.0 | 11.1 | 8.0 |

Tabla 16. Valores de las constantes

| Tipo de suelo | X_s | η |
|--|------------------|--------|
| | t/m ³ | |
| Arcilla del lago de Texcoco preconsolidado y virgen | 1.20 | 23.33 |
| Arcillas del lago Xochimilco-Chalco | 1.20 | 26.40 |
| Suelos areno-limosos de las capas duras en todo el valle | 1.65 | 40.00 |

En la Figura 35 se presenta la gráfica de la resistencias medias q_c y las velocidades de onda de corte S utilizando la expresión (29), con un valor correlacionable de 10. De igual manera, en la Tabla 18 se presentan los análisis efectuados. Asimismo, en la Tabla 17 se muestran un resumen de los resultados obtenidos.

Tabla 17. Resultados de la velocidad cortante y la densidad promedio

| ESTRATO | S m/s ² | ts^2/m^4 |
|--------------------------------|----------------------|------------|
| H ₁ | 64.19 | 0.126 |
| H ₂ | 142.61 | 0.140 |
| H ₁ +H ₂ | 83.56 | 0.132 |

3. Determinar la relación de esbeltez H_o/r_o y el contraste de rigidez estructura-suelo β_o/β_1 , considerando que $\beta_o = \sqrt{G_o/\rho_o}$.

El módulo de rigidez al cortante del concreto G_o esta dado por la siguiente expresión:

$$G_o = \frac{E}{2(1+\epsilon)} \quad (33)$$

Considerando un valor de $f'c = 350 \text{ kg/cm}^2$, un módulo de elasticidad $E = 261,916 \text{ kg/cm}^2$, con una relación de Poison de $\epsilon = 0.2$ y una densidad $\rho_o = 2400 \text{ kg/m}^3$, se obtiene una velocidad de corte S_o de 674.33 m/seg .

Con un valor de $H_o = 35 \text{ m}$ y un $r_o = 7.5 \text{ m}$ se tiene una relación de esbeltez de:

$$H_o/r_o = 35/7.5 = 5$$

El contraste de rigidez estructural estructural – suelo β_o/β_1 es:

$$S_o/S_1 = 674.33/64.19 = 10$$

4. Obtener para estos casos los coeficientes de cortante y momento estáticos, así como los correspondientes factores de amplificación dinámica.

Con base en los datos obtenidos en el inciso anterior, se tienen que usar los coeficientes de cortante, momentos estáticos y factores de amplificación dinámica que se muestran en Figura 36.

5. Estimar los valores de \tilde{Q}_o y \tilde{M}_o y de F_Q y F_M .

La configuración de los coeficientes de respuesta para cortante y momento resultan de la interpolación para la lumbrera completa utilizando los coeficientes de respuesta de la Figura 36, se calcula el cortante y momento estáticos con las fórmulas siguientes:

$$\text{Cortante estático} \quad Q_o = \pi r_o \rho_1 \ddot{x}_g H_o^2 \tilde{Q}_o$$

$$\text{Momento estático} \quad M_o = \pi r_o \rho_1 \ddot{x}_g H_o^3 \tilde{M}_o$$

6. Determinar el cortante y momento dinámicos como:

$$Q_d = F_Q Q_o / \mu$$

$$M_d = F_M M_o / \mu$$

donde μ es el factor de reducción por ductilidad, que se tomará igual a 1 para la condición temporal e igual a 2 para la condición definitiva.

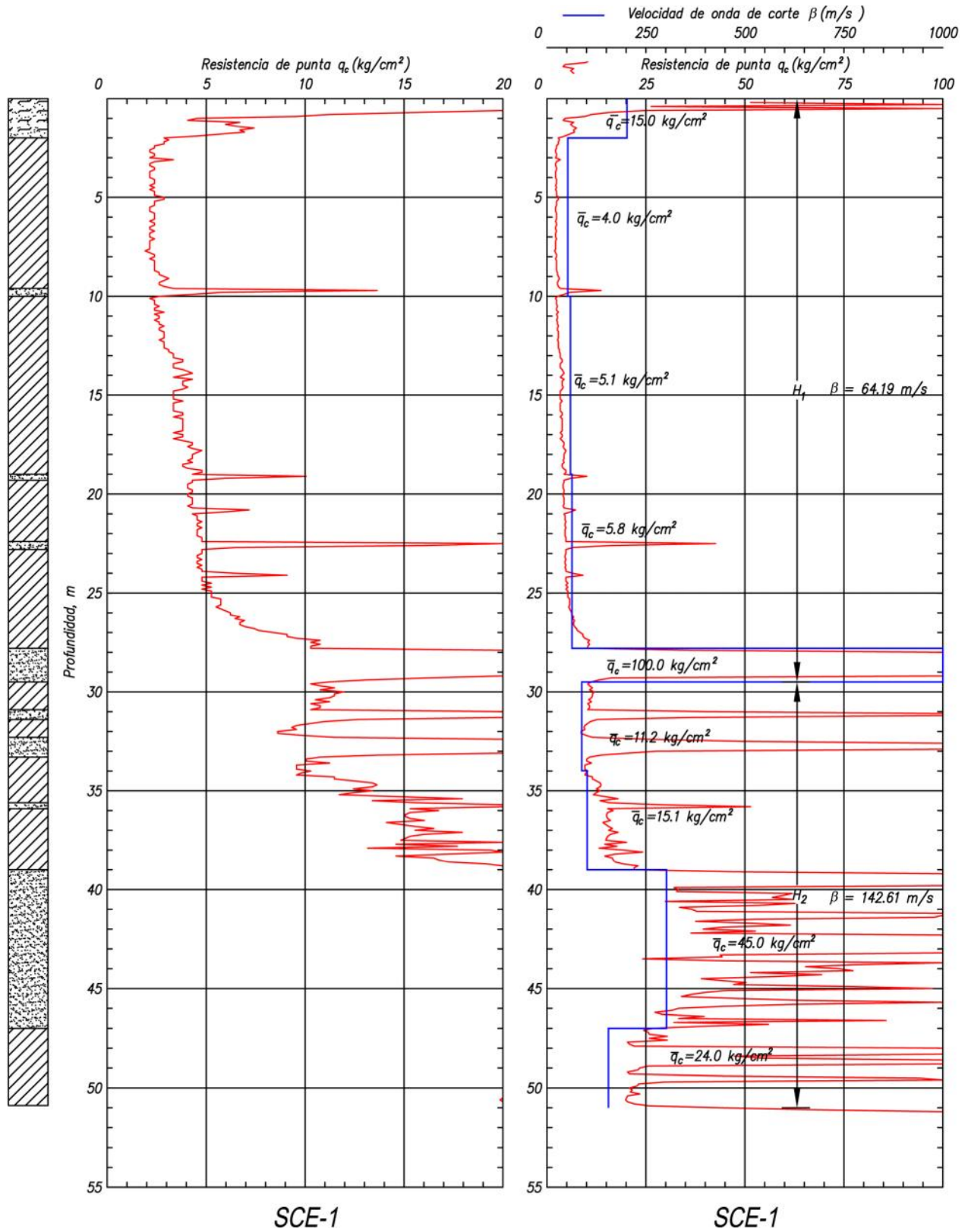


Figura 35. Velocidad de onda de corte

Tabla 18. Resultados obtenidos de velocidad de corte s , densidad ... promedia y periodo dominante T_s

| No. | Estrato Nombre | profundidad | | Espesor m | q_c kg/cm ² | q_c t/m ² | h | g t/m ³ | N_{kh} | $s = y \sqrt{\frac{q_c}{N_{kh} X_s}}$ | H_i/b_i | r ts ² /m ⁴ | H_i/r |
|-----|---|-------------|-------|--------------|-----------------------------|---------------------------|-------|-----------------------|----------|---------------------------------------|-----------|--|---------|
| | | de | a | | | | | | | | | | |
| 1 | COSTRA SUPERFICIAL | 0.00 | 2.00 | 2.00 | 15.0 | 150.0 | 40.00 | 1.50 | 8.0 | 212.13 | 0.009 | 0.153 | 13.080 |
| 2 | ARCILLA DE ALTA COMPRESIBILIDAD | 2.00 | 10.00 | 8.00 | 4.0 | 40.0 | 23.33 | 1.20 | 9.5 | 52.44 | 0.153 | 0.122 | 65.400 |
| 3 | ARCILLA DE ALTA COMPRESIBILIDAD | 10.00 | 19.00 | 9.00 | 5.1 | 51.0 | 23.33 | 1.20 | 9.5 | 59.21 | 0.152 | 0.122 | 73.575 |
| 4 | ARCILLA DE ALTA COMPRESIBILIDAD | 19.00 | 28.00 | 9.00 | 5.8 | 58.0 | 23.33 | 1.20 | 9.5 | 63.15 | 0.143 | 0.122 | 73.575 |
| 5 | SUELOS ARENOSOS Y LIMOSOS DE ALTA COMPACIDAD | 28.00 | 29.50 | 1.50 | 100.0 | 1000.0 | 40.00 | 1.65 | 11.1 | 487.69 | 0.003 | 0.168 | 8.918 |
| | | | | 29.50 | | | | | | 874.622 | 0.460 | | 234.548 |
| 6 | ARCILLA DE MEDIANA COMPRESIBILIDAD | 29.50 | 34.00 | 4.50 | 11.2 | 112.0 | 23.33 | 1.20 | 9.5 | 87.75 | 0.051 | 0.122 | 36.788 |
| 7 | ARCILLA DE MEDIANA COMPRESIBILIDAD | 34.00 | 39.00 | 5.00 | 15.0 | 150.0 | 23.33 | 1.20 | 9.5 | 101.55 | 0.049 | 0.122 | 40.875 |
| 8 | SUELOS ARENOSOS Y LIMOSOS DE MEDIANA A ALTA COMPACIDAD | 39.00 | 47.00 | 8.00 | 45.0 | 450.0 | 40.00 | 1.65 | 11.1 | 327.15 | 0.024 | 0.168 | 47.564 |
| 9 | ARCILLA DE MEDIANA COMPRESIBILIDAD A BAJA COMPRESIBILIDAD | 47.00 | 51.00 | 4.00 | 30.0 | 300.0 | 23.33 | 1.40 | 9.5 | 155.12 | 0.026 | 0.143 | 28.029 |
| | Σ | | | 21.50 | | | | | | | 0.15 | | 153.25 |

51.000

0.610

387.803

Espesor H_1 :

$$s = \frac{H}{\sum_n \frac{h_n}{s_n}} = 64.19 \text{ m/seg}$$

Espesor H_2 :

$$s = \frac{H}{\sum_n \frac{h_n}{s_n}} = 142.61 \text{ m/seg}$$

Todo el espesor:

$$s = \frac{H}{\sum_n \frac{h_n}{s_n}} = 83.56 \text{ m/seg}$$

Periodo dominante:

$$T_s = \frac{4H}{s} = 2.44 \text{ seg}$$

$$\dots = \frac{H}{\sum_n \frac{h_n}{\dots_n}} = 0.126 \text{ ts}^4/\text{m}^4$$

$$\dots = \frac{H}{\sum_n \frac{h_n}{\dots_n}} = 0.140 \text{ ts}^4/\text{m}^4$$

$$\dots = \frac{H}{\sum_n \frac{h_n}{\dots_n}} = 0.132 \text{ ts}^4/\text{m}^4$$

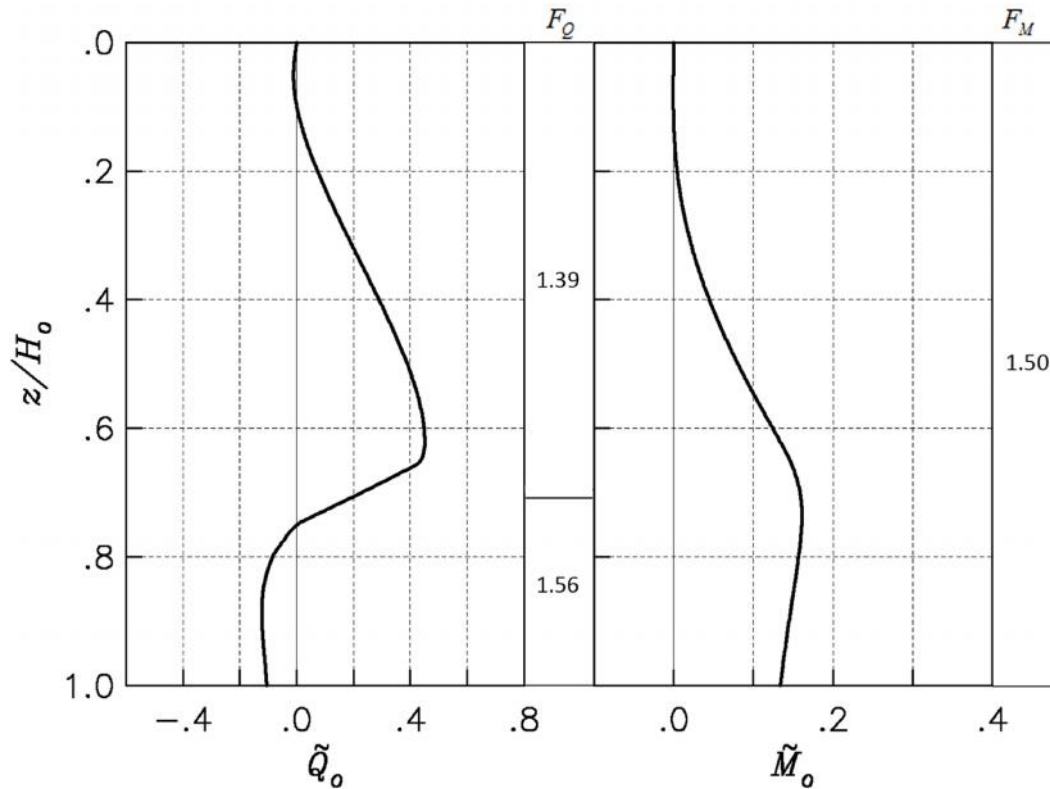


Figura 36. Coeficientes de respuesta para el cortante y momentos estáticos

En la Figura 37 se muestran los resultados para la condición temporal ($T_r = 47.5$ años) y en la Figura 38 se indican los resultados para la condición definitiva ($T_r = 475$ años).

3.12 Análisis esfuerzo-deformación con MEF

Los métodos de equilibrio límite son adecuados para predecir las cargas de falla, sin embargo, no son capaces de determinar las deformaciones asociadas. Dado que el proceso constructivo es evolutivo, el modelo de análisis debe contemplar el desarrollo de las presiones y deformaciones conforme se realice la excavación. Los modelos utilizados con más frecuencia son:

- a) Los modelos con resorte
- b) Los modelos de elementos finitos

Para analizar el estado de esfuerzos y deformaciones en la masa de suelo generado por la construcción de la lumbrera, se realizó un análisis con el método del elemento finito (MEF) con el programa de computadora PLAXIS versión 8.2; esta es una herramienta complementaria que permite verificar el cálculo convencional del comportamiento y de estabilidad durante la excavación.

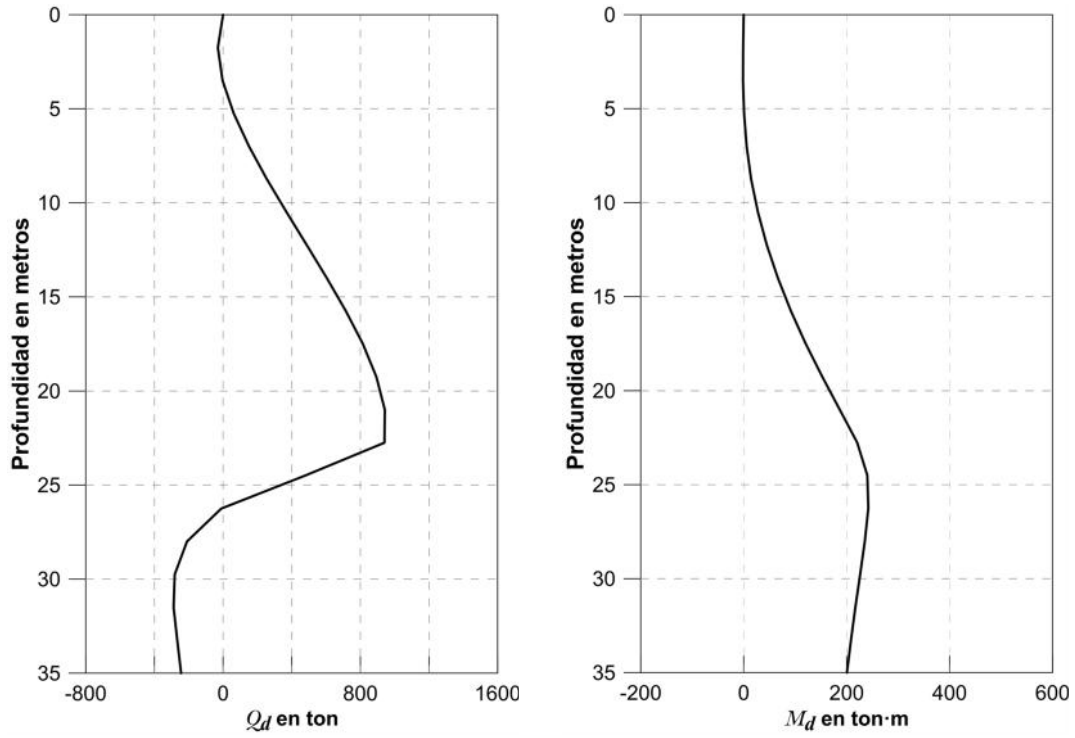


Figura 37. Cortante y momento dinámicos para la condición temporal

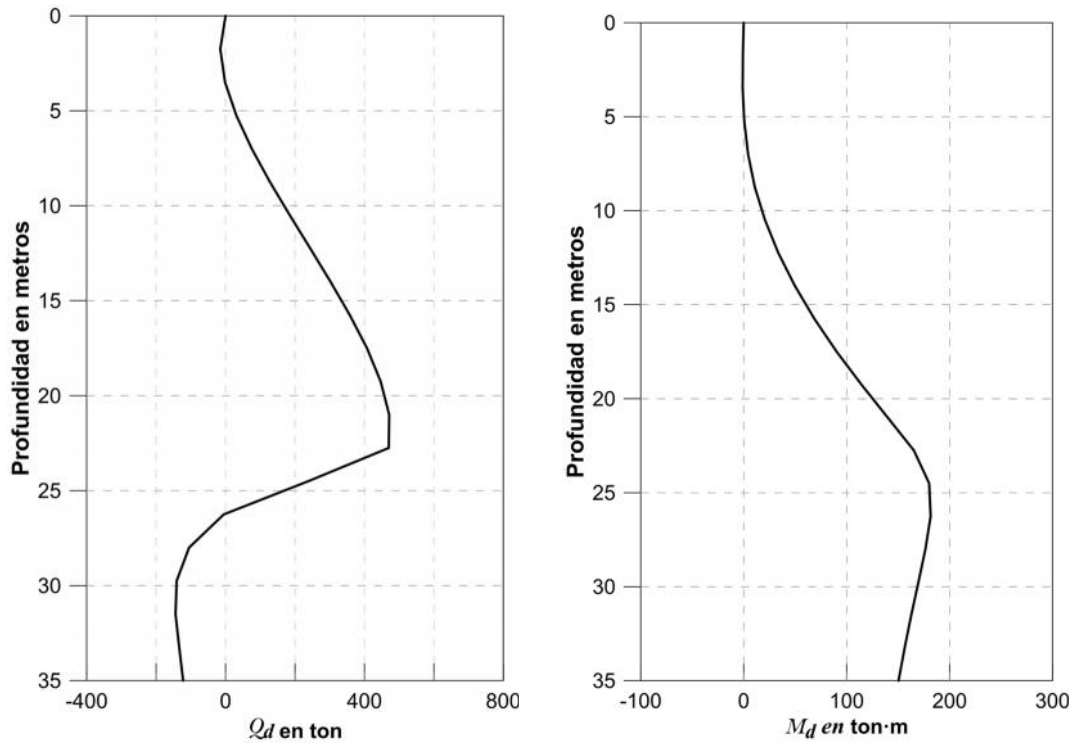


Figura 38. Cortante y momentos dinámicos para la condición definitiva

3.12.1 Condiciones iniciales

Modelo. Se consideró un modelo axisimétrico, es decir, un estado de esfuerzos y deformaciones idéntico en cualquier dirección radial; el muro milán se simuló como un elemento placa con rigidez a la flexión y a los esfuerzos normales, combinado con elementos de interfaz suelo-estructura. La Figura 39 muestra el modelo geomecánico utilizado para el análisis; se observa una sección correspondiente a un radio de 7.5 m que alcanza la profundidad máxima de excavación de 35 m; las fronteras se extendieron del orden de tres diámetros en la parte inferior y cuatro diámetros en sentido lateral.

Malla. Consta de 2,572 elementos isoparamétricos triangulares de seis nodos y tres puntos de integración cada uno (Figura 40); las condiciones de frontera se definieron de manera que no influyeran en la distribución de esfuerzos en la zona de la lumbrera; para las fronteras verticales se impuso la condición de desplazamientos horizontales restringidos y verticales libres; en la frontera horizontal inferior se asignaron desplazamientos horizontales y verticales restringidos.

De la Figura 40 a la Figura 43 se muestran las distintas etapas de excavación.

Análisis elasto-plástico. Se considera que el comportamiento del suelo está regido, además del módulo de Young, E , y la relación de Poisson, ϵ , por la ley de resistencia de Mohr-Coulomb, la cual expresa que la resistencia al esfuerzo cortante, s , de un elemento de suelo, es función de la cohesión, c , del esfuerzo normal, \dagger , y del ángulo de fricción interna, w . Es decir,

$$s = c + \dagger \cdot \tan w$$

El suelo alcanza deformaciones plásticas cuando se rebasa la envolvente de esta ley de resistencia. Bajo este criterio de plastificación se estudiaron la estabilidad y las deformaciones de la lumbrera; en el análisis no se consideraron sobrecargas externas ni presiones de agua intersticial, debido a las condiciones de abatimiento en el sitio y al efecto del bombeo local durante la construcción.

El cálculo del coeficiente de empuje en reposo se calcula con $k_0 = 1 - \text{sen} w$ para suelos donde su ángulo de fricción interna sea sensiblemente mayor en aportación a la resistencia respecto de su cohesión y $k_0 = \frac{\epsilon}{1-\epsilon}$ para suelos predominantemente cohesivos.

Parámetros geotécnicos del modelo. Se considera el comportamiento del suelo durante la construcción, es decir, a corto plazo; con base en la información de los estratos de la Tabla 19 se realizó el análisis de elemento finito.

Elementos estructurales. El muro milán de 1.0 m de espesor se simuló como un elemento placa con rigidez a la flexión, combinado con elementos de interfaz suelo-estructura, las propiedades de este elemento placa se muestran en la Tabla 20.

Tabla 19. Parámetros geotécnicos del modelo para Plaxis

| Estrato | Suelo | Profundidad m | ν | k_o | γ kN/m ³ | C kN/m ² | w | E kN/m ² |
|---------|-------|------------------|-------|-------|-------------------------------|--------------------------|-----|--------------------------|
| A | CS | 0.0 a 2.6 | 0.3 | 0.58 | 14 | 40 | 25 | 3500 |
| B | FAS | 2.6 a 9.7 | 0.45 | 0.82 | 12.3 | 15.8 | - | 2000 |
| | | 9.7 a 19.0 | 0.45 | 0.82 | 12.6 | 27 | - | 3000 |
| | | 19.0 a 27.8 | 0.45 | 0.82 | 13.1 | 48 | - | 4500 |
| C | CD | 27.8 a 29.60 | 0.3 | 0.50 | 16 | 150 | 30 | 6000 |
| D | FAI | 29.60 a 39.0 | 0.4 | 0.66 | 13.5 | 91 | - | 5000 |
| E | DP | 39.0 a 47.00 | 0.3 | 0.43 | 16.5 | 125 | 35 | 6500 |
| F | FAP | 47.00 a 51.00 | 0.4 | 0.80 | 14 | 83 | 12 | 4500 |

Tabla 20. Parámetros de los elementos placa para el modelo Plaxis

| Identificación | Profundidad m | ν | EA kN/m | EI kN/m | w kN/m ³ |
|----------------|------------------|-------|------------|------------|--------------------------|
| muro | 0 a 46 | 0.15 | 2.62E+07 | 2.18E+06 | 24 |
| losa de fondo | 2.0 m de espesor | 0.15 | 5.24E+07 | 1.75E+07 | 12 |

3.12.2 Etapas constructivas.

Las etapas de análisis fueron las siguientes:

- Estado inicial de esfuerzos
- Colocación de la sobrecarga por maquinaria
- Construcción del muro milán
- Excavación a 5.0 m de profundidad
- Excavación hasta 10.0 m de profundidad
- Excavación hasta 15.0 m de profundidad
- Excavación hasta 20.0 m de profundidad
- Excavación a 25.0 m de profundidad
- Excavación a 30.0 m de profundidad
- Excavación hasta la profundidad máxima, 35 m.
- Construcción de losa de fondo.

3.12.3 Resultados obtenidos

Para cada fase de cálculo se obtuvo la malla deformada (Ver Figura 40 a la Figura 43), así como los desplazamientos (Figura 44 a la Figura 47) y los esfuerzos inducidos en la masa de suelo debido a la excavación de la lumbrera en su máxima profundidad (Figura 48); finalmente, se presentan los puntos plásticos a la profundidad máxima (Figura 48).

MODELO GEOMECÁNICO

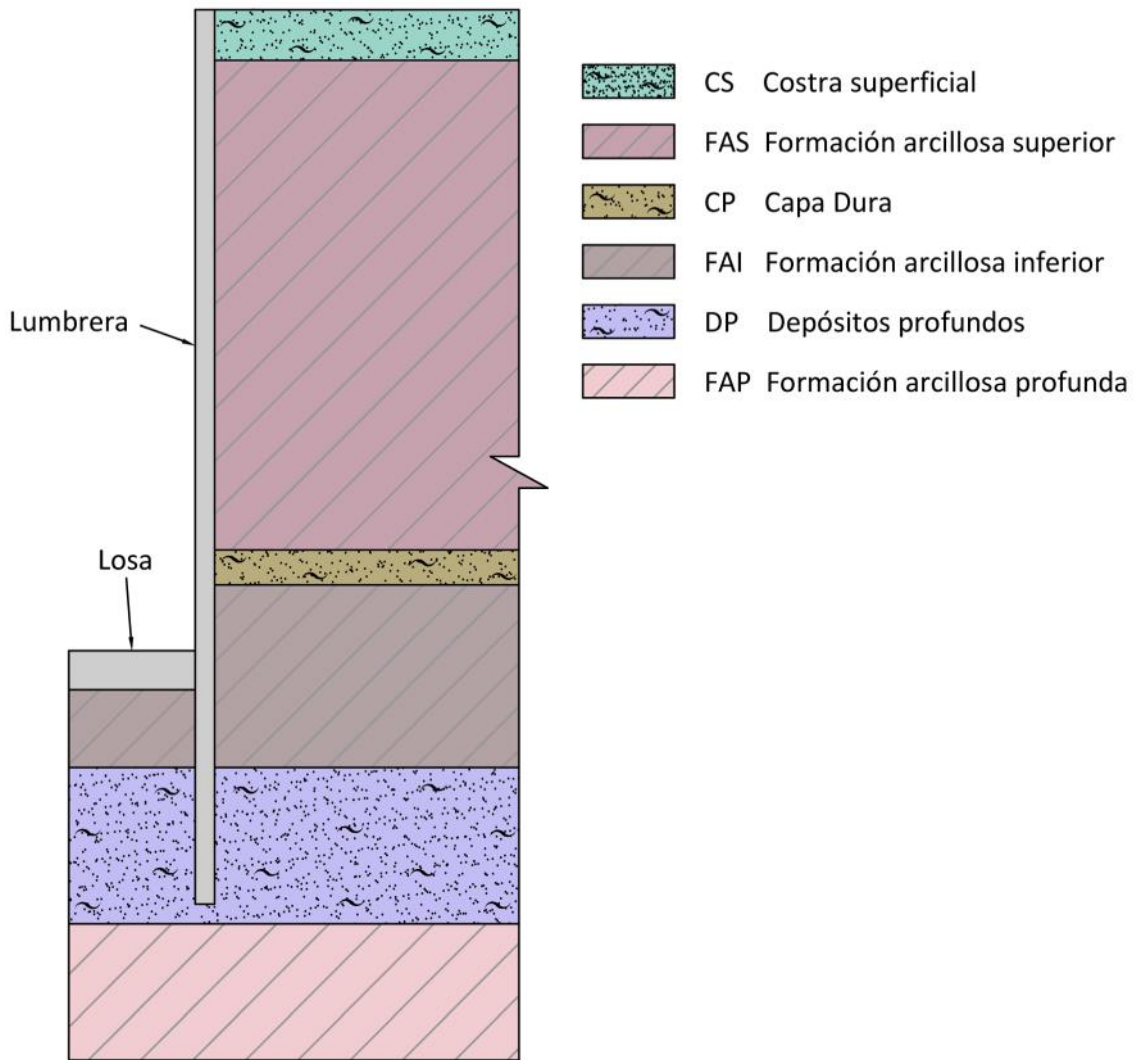


Figura 39. Modelo geomecánico axisimétrico para el análisis de elemento finito

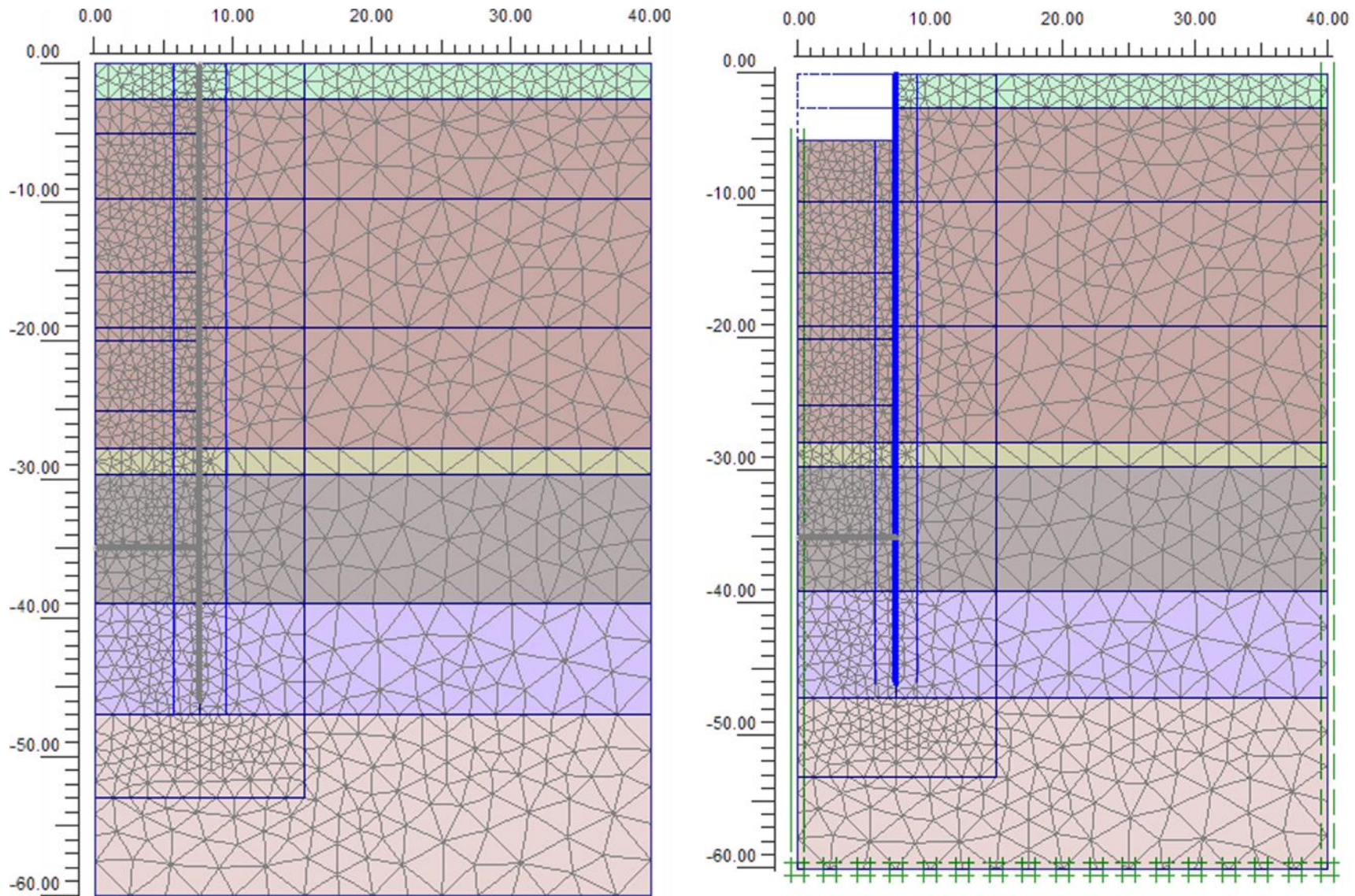


Figura 40. Malla de elementos finitos al inicio (izquierda) y a los 5 m de excavación (derecha)

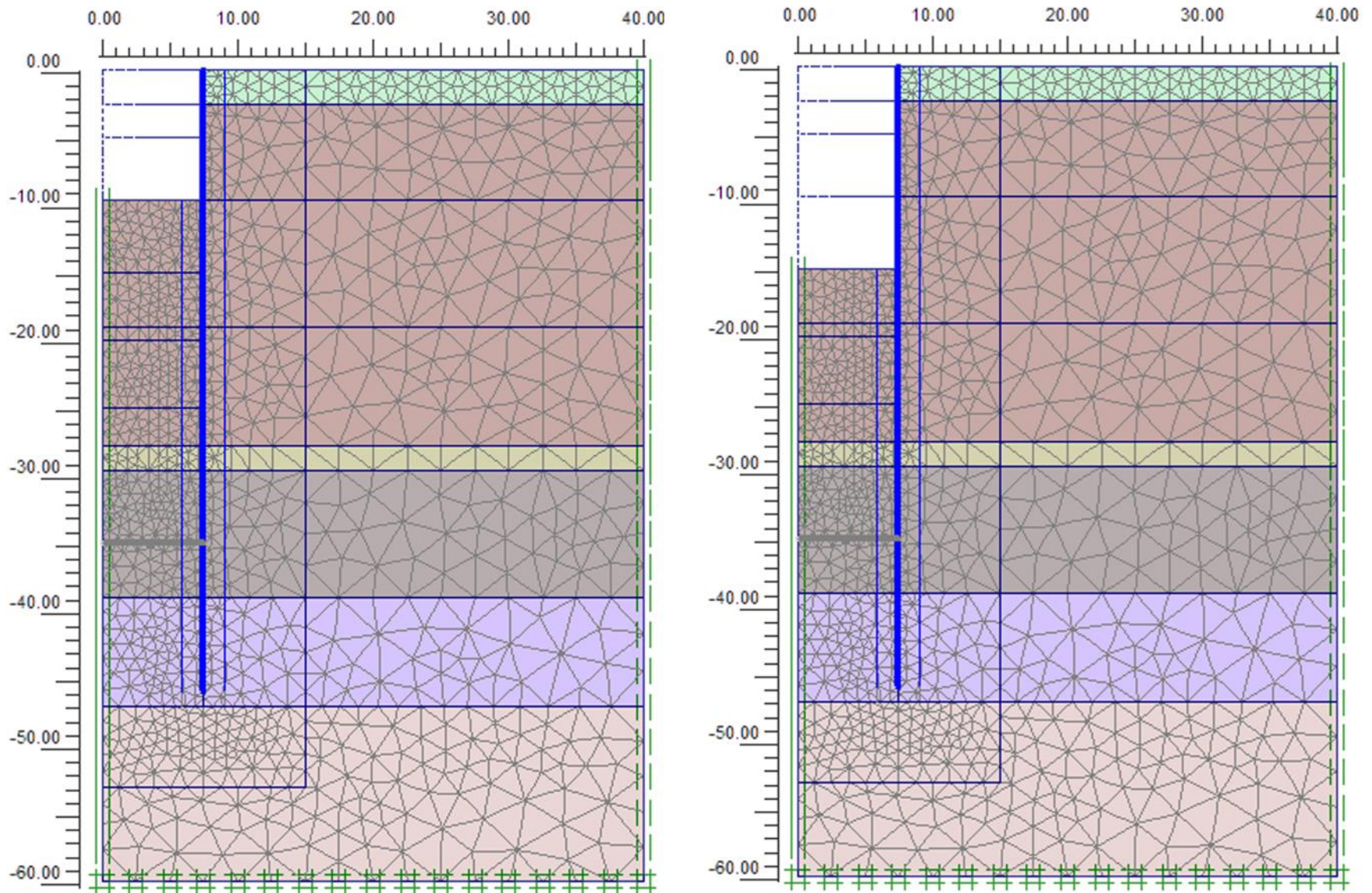


Figura 41. Malla de elementos finitos a los 10 m (izquierda) y a los 15 m de excavación (derecha)

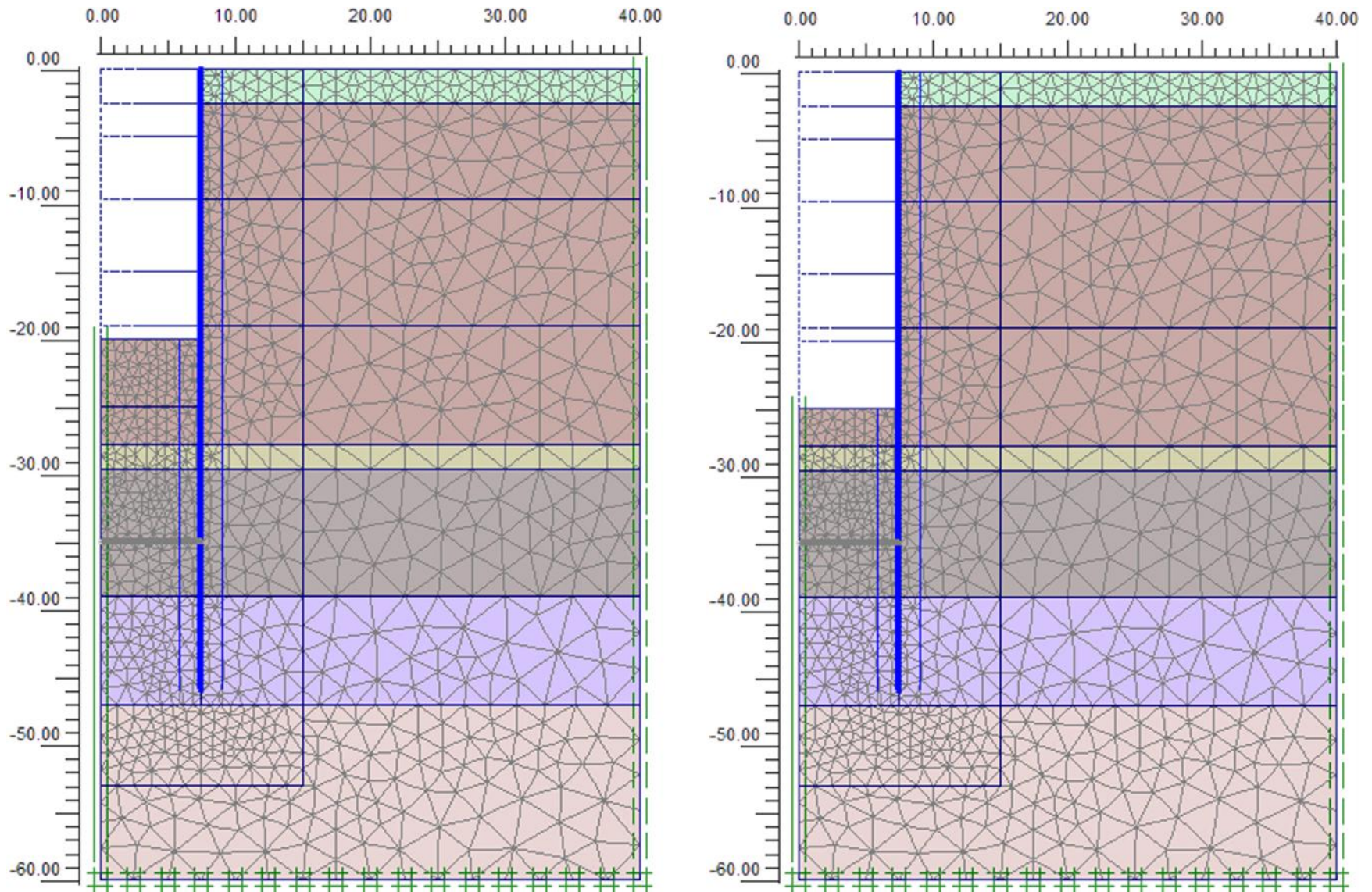


Figura 42. Malla de elementos finitos a los 20 m (izquierda) y a los 25 m de excavación (derecha)

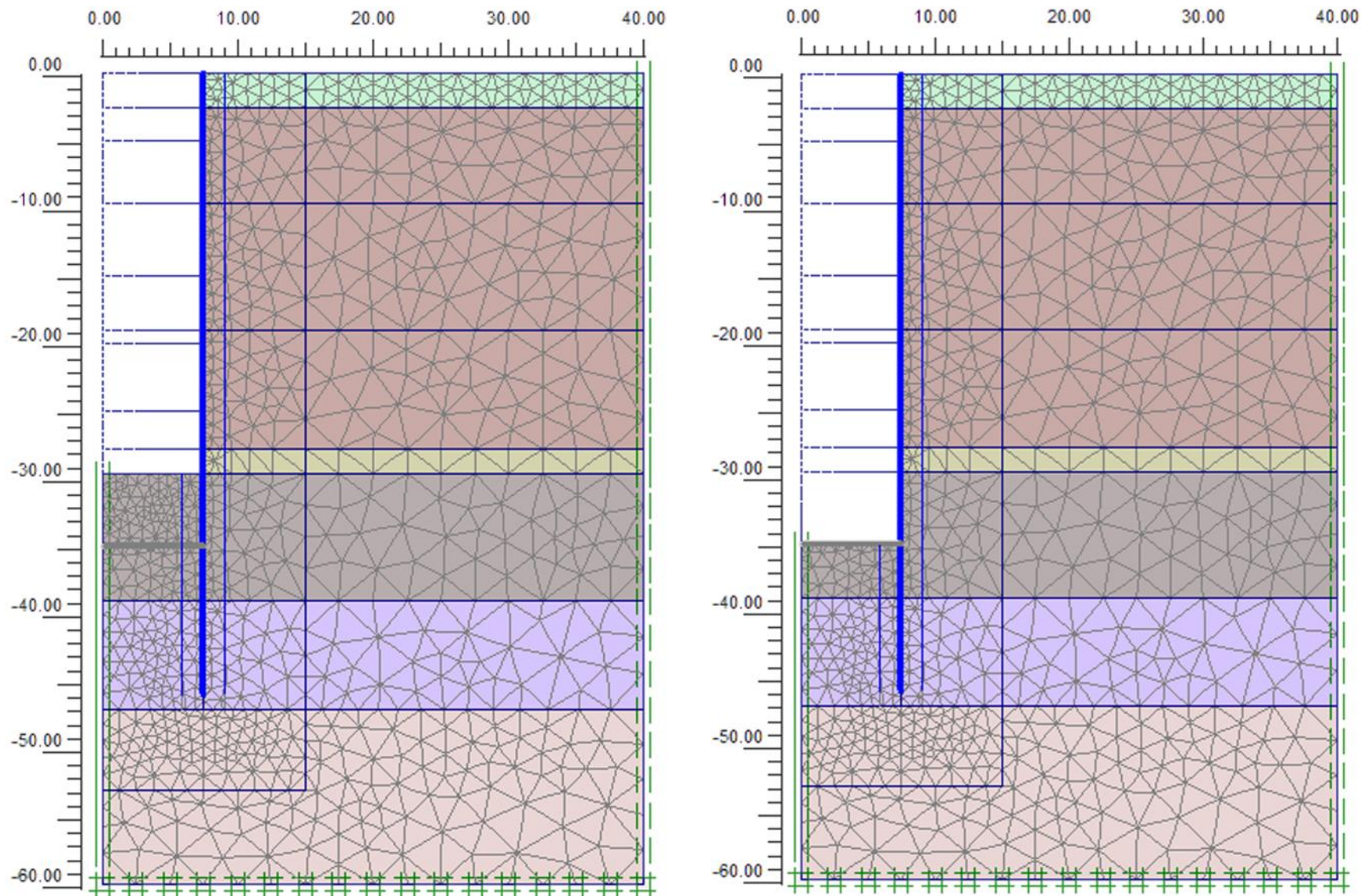


Figura 43. Malla de elementos finitos a los 30 m (izquierda) y a los 35 m de excavación (derecha)

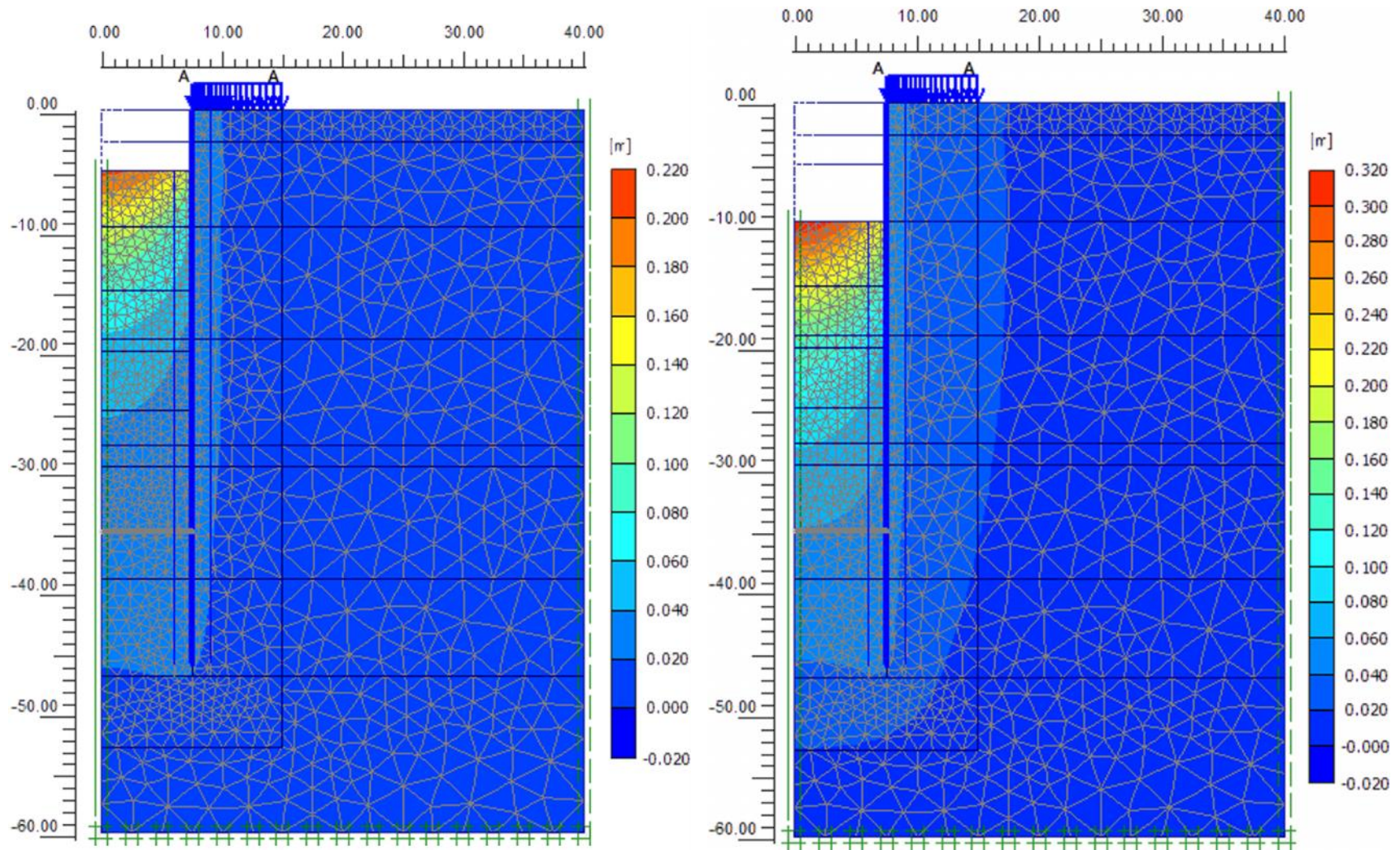


Figura 44. Desplazamientos excavación a 5m, $u_{\max}=20.0\text{cm}$ (izquierda) y 10m, $u_{\max}=32.0\text{cm}$ (derecha)

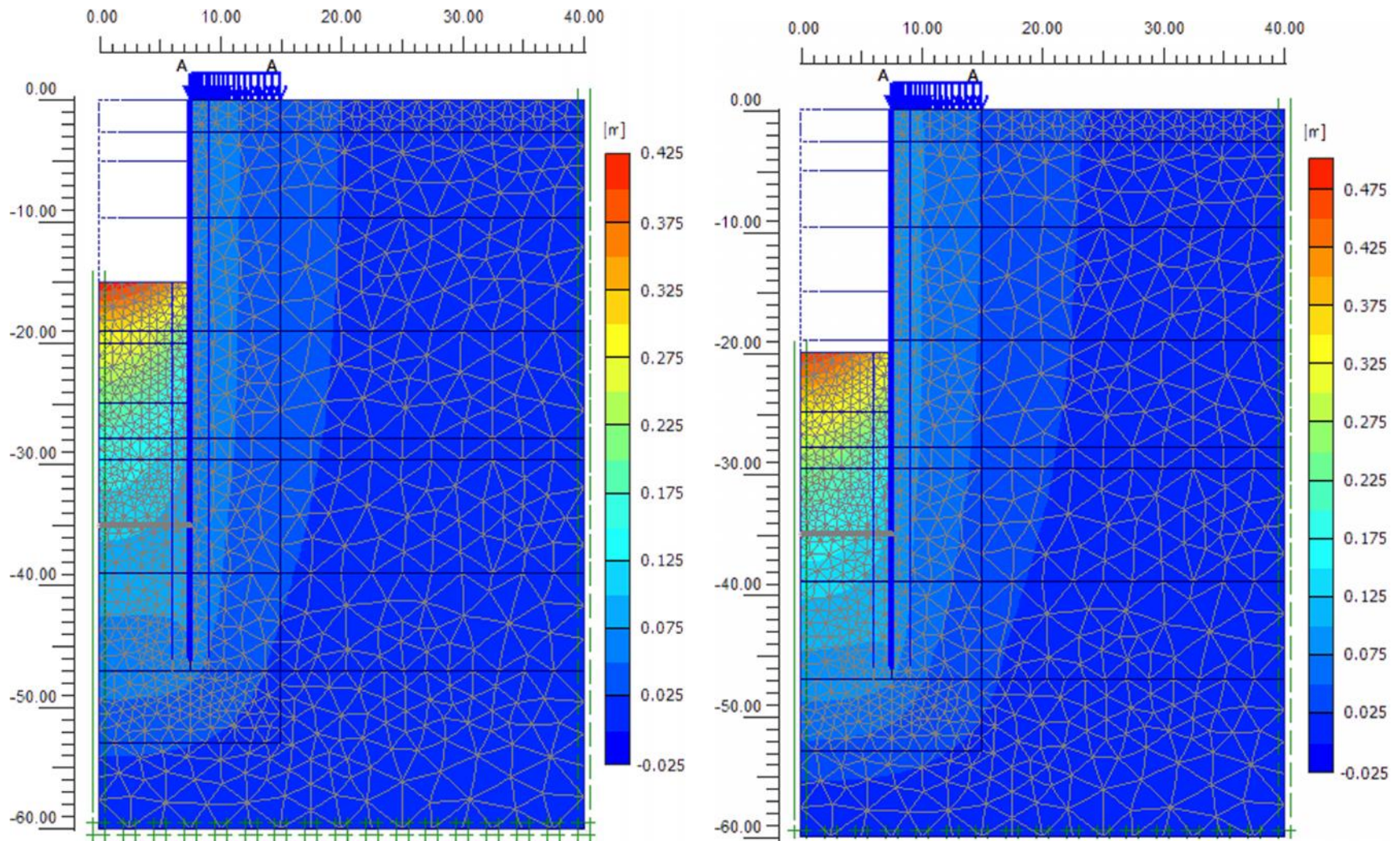


Figura 45. Desplazamientos excavación a 15m, $U_{max}=42.0\text{cm}$ (izquierda) y 20m, $U_{max}=47.6\text{cm}$ (derecha)

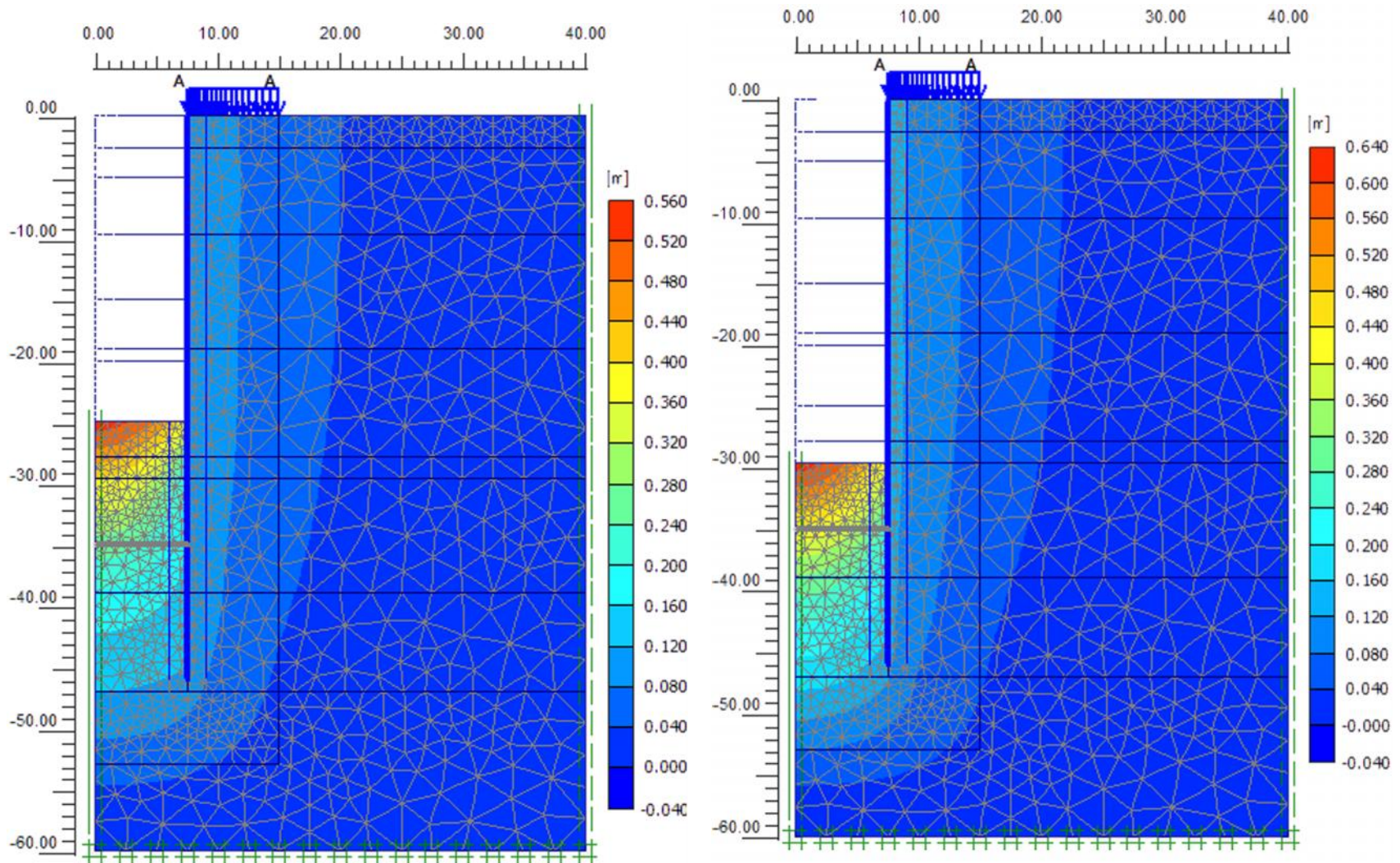


Figura 46. Desplazamientos excavación a 25m, $U_{max}=54.1\text{cm}$ (izquierda) y 30m, $U_{max}=62.3\text{cm}$ (derecha)

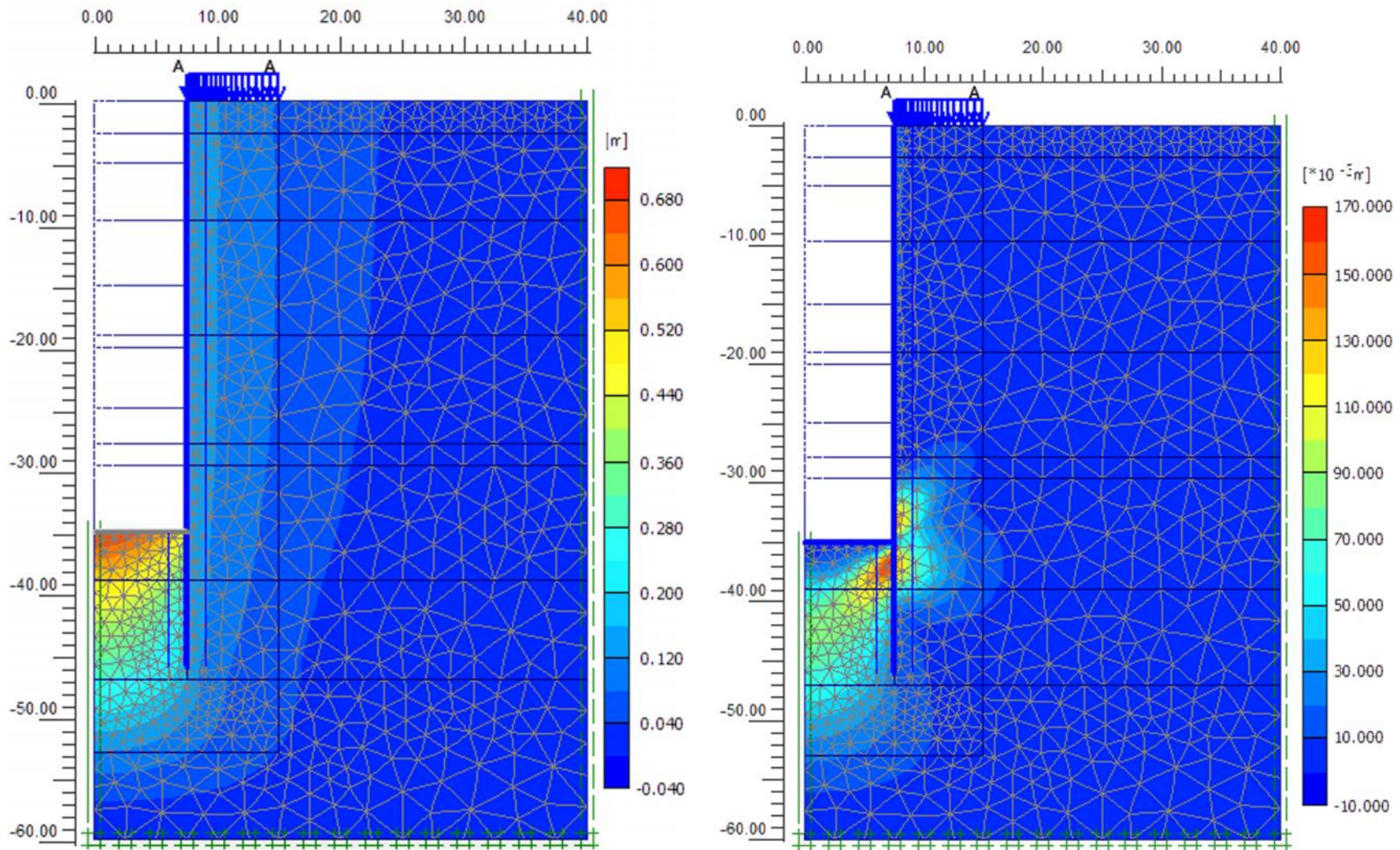


Figura 47. Desplazamientos excavación a 35m, $u_{\max} = 69.2\text{cm}$ (izquierda) y construcción de losa de fondo, $u_{\max} = 16.6\text{cm}$ (derecha)

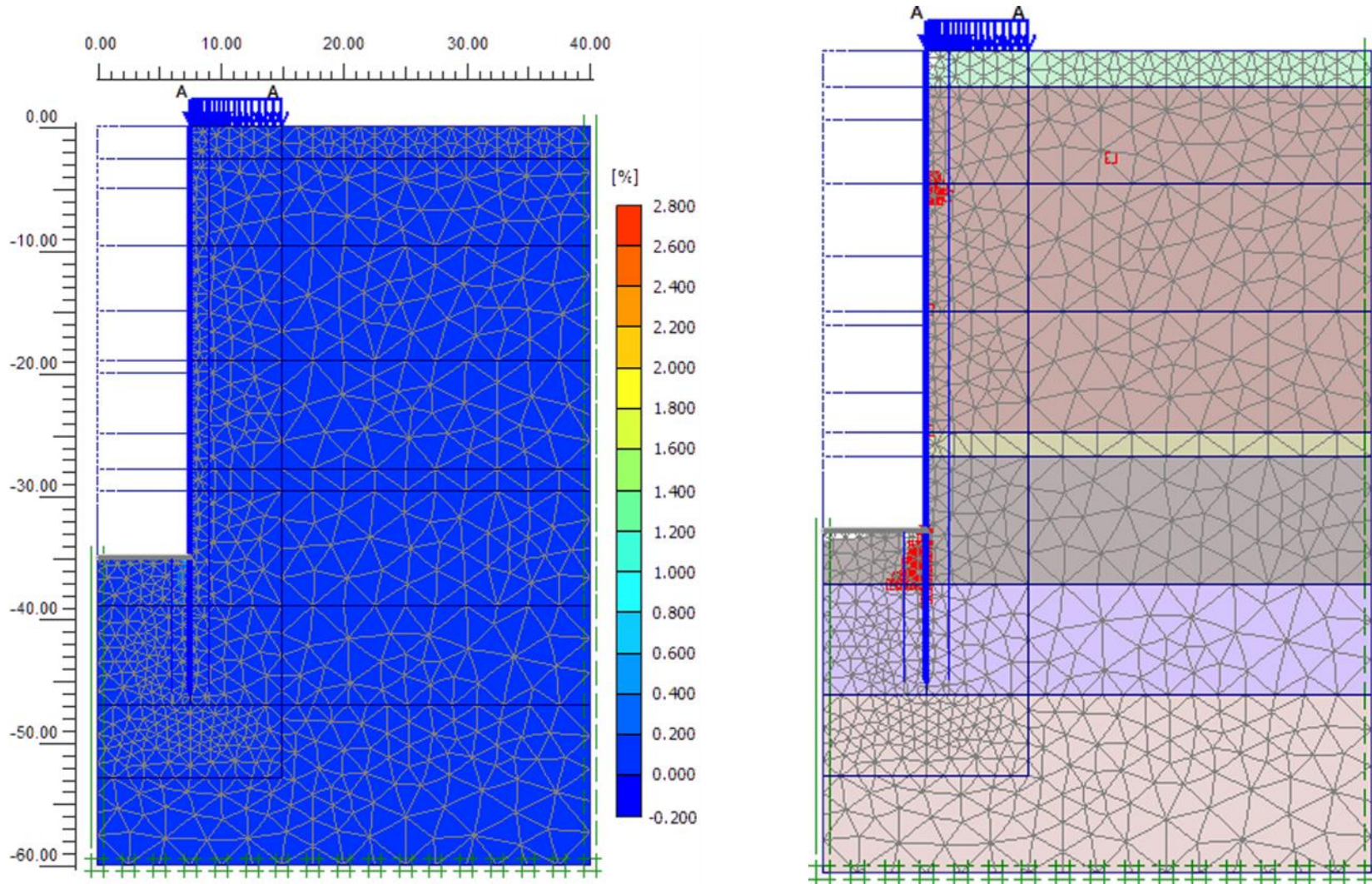


Figura 48. Incremento de fuerza cortante (izquierda) y puntos de plastificación (derecha) a la profundidad máxima de excavación (35m)

4. PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO GENERAL

A continuación se presenta el procedimiento general de construcción para la lumbrera con muro Milán colado *in situ*:

4.1 Abatimiento del nivel freático

Se tendrá que abatir el nivel freático mediante pozos de bombeo profundo tal y como se describe en el inciso 3.6, el abatimiento será 3 m debajo del nivel máximo de excavación, es decir, a 38.0 m de profundidad.

4.2 Construcción de la plataforma de trabajo.

Como actividades previas al inicio de los trabajos de construcción de la lumbrera, se construirá una plataforma plana y competente de trabajo, para el correcto soporte de los equipos de excavación, maniobras de colocación de armados y colado de concreto, de 20 cm de espesor con material de banco (“tepetate” -arena limosa-), compactada al 95 % de la prueba Próctor Estándar.

4.3 Construcción del brocal temporal.

Esta estructura tiene una altura entre 1.0 y 1.5 m y un ancho ligeramente superior a la del futuro muro y por lo general es de concreto armado o acero (Figura 49). El brocal tiene las siguientes funciones:

- Materializa la implantación, permite marcados y nivelaciones.
- Sirve de apoyo para las maniobras (tubo de junta, armaduras).
- Sirve de reserva de lodo al principio de la perforación.
- Asegura la estabilidad del suelo en la superficie.
- Sirve de guía a los equipos de excavación.
- Sirve de sustento cuando los suelos superficiales presenten problemas de estabilidad

Se construyen brocales exteriores e interiores.

4.4 Muro Milán

1) *Excavación de tableros de muro Milán.*

La perforación se realizará en forma alterna, es decir, la secuencia de perforación de la zanja se realizará en paneles con las siguientes características (Figura 50):

- Tablero independiente confinado por tubos junta, muro anterior y posterior no contruidos (C).

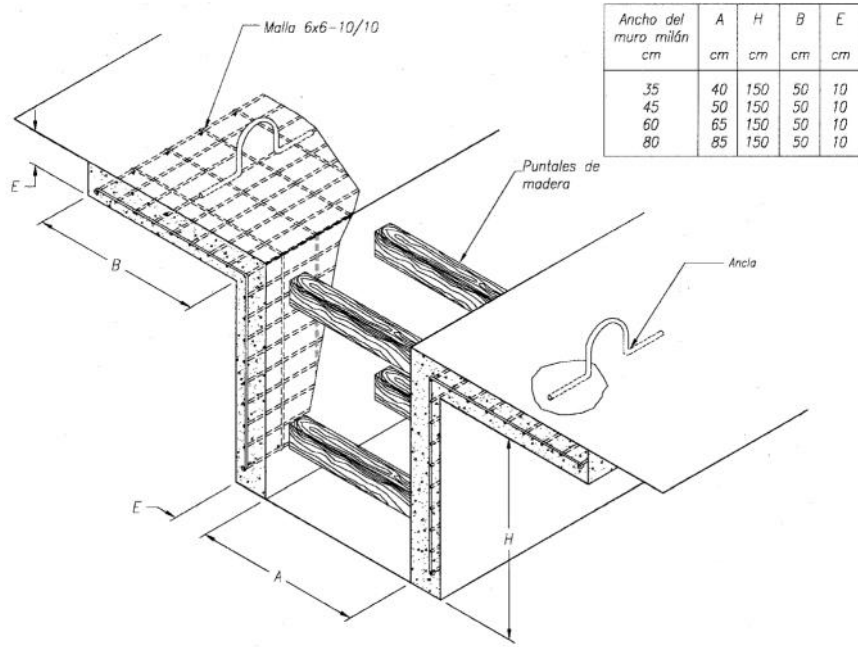


Figura 49. Detalle del brocal

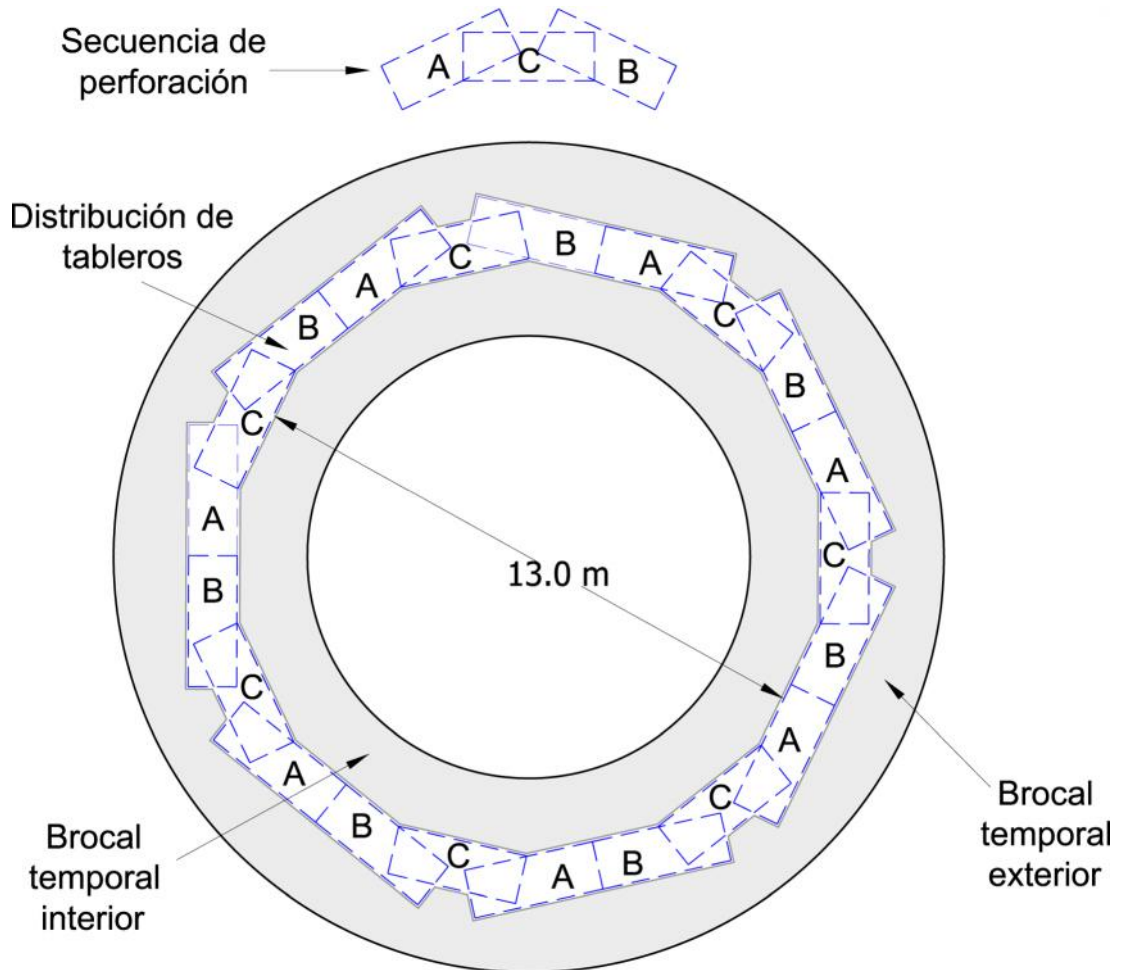


Figura 50. Secuencia de excavación de tableros

- Tablero que liga (A y B), en ambos extremos hay muros construidos y tienen edad mínima necesaria para soportar la maniobra de limpieza de sus juntas machiembradas.

La excavación del tablero se realiza con una almeja hidráulica montada sobre una grúa con control de la vertical para reducir las desviaciones. No se deben dejar los paneles totalmente excavados y estabilizados por mucho tiempo, no más de 24 hr antes de colar el muro.

- 2) *Sustitución de suelos por lodo bentonítico.* Las perforaciones efectuadas se llenarán con lodo bentonítico que sirve para mantener estables las paredes de la excavación hasta terminar el colado del concreto.
- 3) *Colocación de juntas.* se colocan en una sola parte en las extremidades del panel inmediatamente después de la operación de desarenación (Figura 51). Las juntas deben satisfacer los siguientes requerimientos.
 - Resistir la presión del concreto fresco sin experimentar excesiva distorsión o deformación y sin permitir la fuga lateral del concreto.
 - Protege el panel previamente colado de los impactos de la almeja y permitir la excavación del panel adyacente.
 - El machimbrado que produce la junta deberá quedar limpio y ser capaz de soportar cierta fuerza cortante entre paneles consecutivos, además dificultará el paso del agua buscando que la unión entre los módulos sea lo más herméticamente posible.

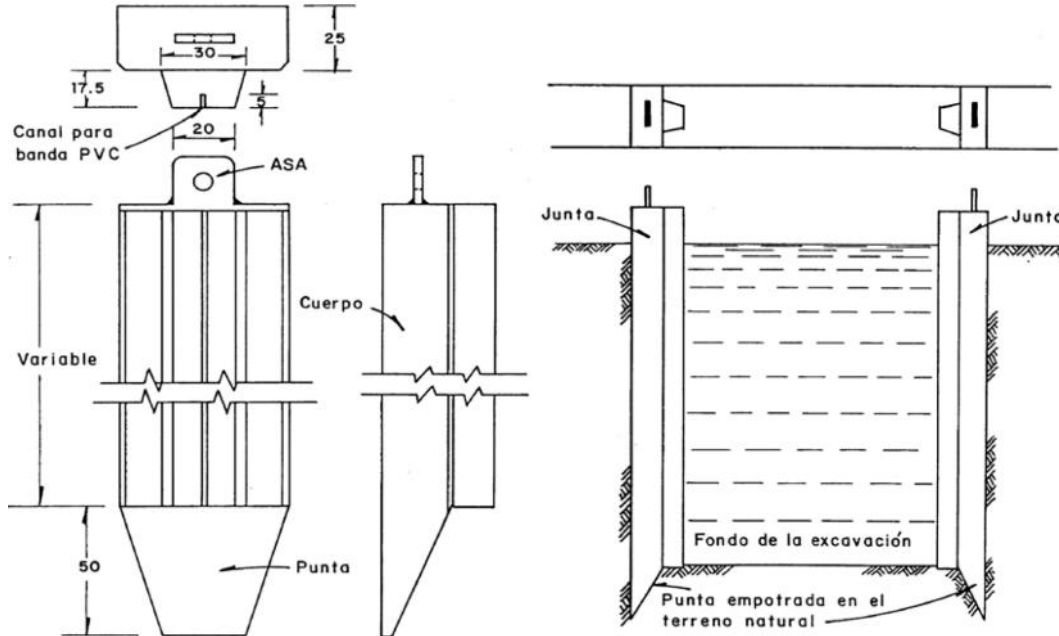


Figura 51. Junta de muro Milán

En la Figura 51 se observa un croquis de los elementos que comúnmente se emplean para moldear las juntas de los tableros del muro Milán, para lograr el machimbrado 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 a 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.

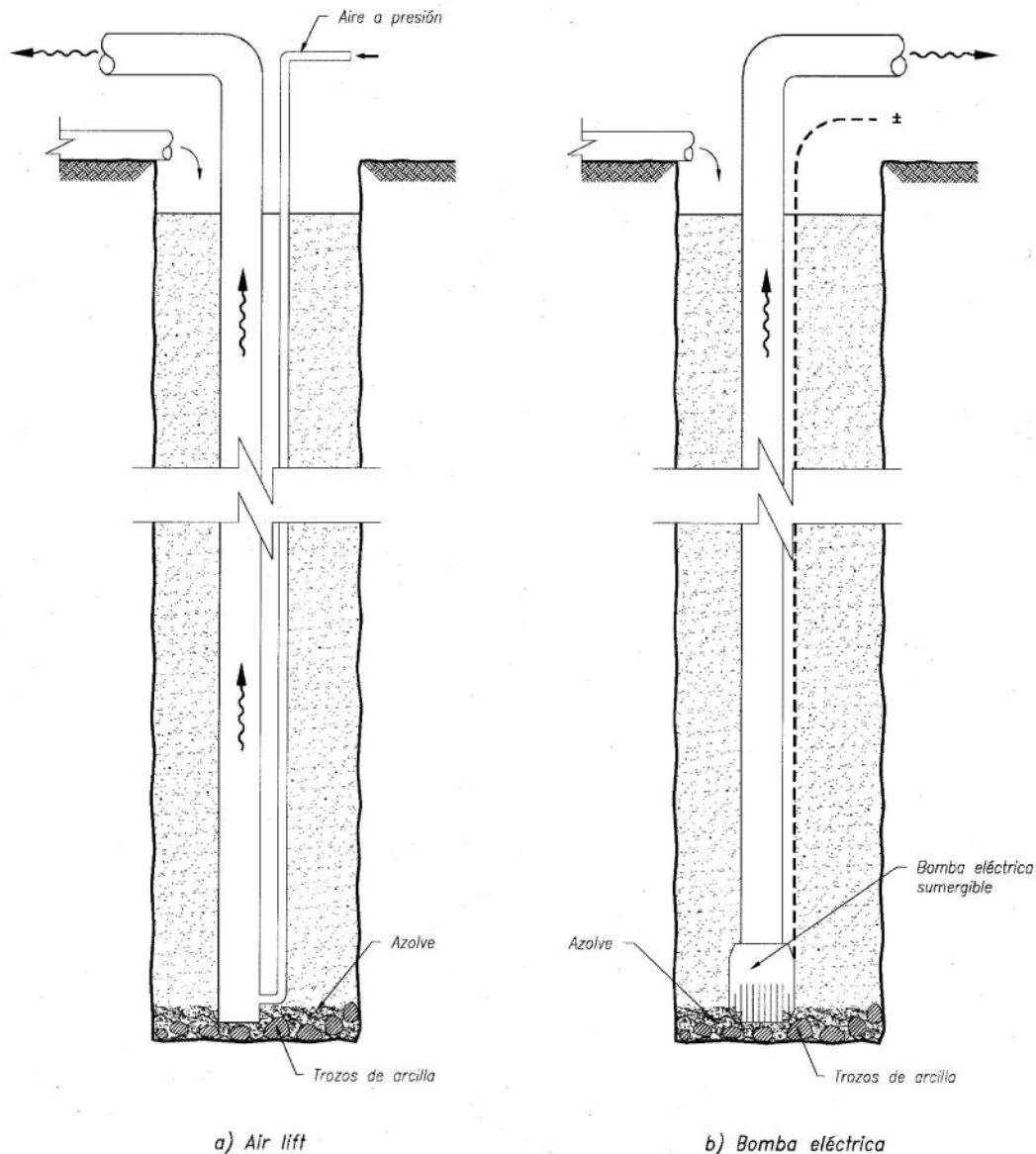


Figura 52. Limpieza del fondo de la zanja

- 4) *Limpieza del fondo.* Una vez concluida la excavación y antes de colocar el concreto, de cada tablero se debe limpiar el fondo de la zanja para eliminar los detritus que se desprenden de las almejas o de las brocas, porque los trozos sueltos de suelo que queden en el fondo por su menor densidad flotarán cuando se vacía el concreto. Esta limpieza se hace extrayendo el lodo del fondo de la zanja para arrastrar los trozos de suelo y el azolve depositado mediante una bomba neumática de succiones *air lift* o una bomba eléctrica sumergible; cualquiera de ellos requiere por lo menos de unos 5 minutos para lograr la limpieza. Después de eliminada

la arena se le agrega lechada fresca para justar la viscosidad y se reincorpora a la lechada que llena la zanja (Figura 52).

- 5) *Habilitado del acero.* El acero será habilitado en la obra según las especificaciones de los planos de construcción.

Izado. Al levantar los armados de acero suelen sufrir distorsiones y deformaciones por peso propio. En el diseño de la jaula de acero de refuerzo es necesario decidir si las parrillas del armado serán una jaula rígida o flexible; las jaulas rígidas se logran agregando varillas soldadas para arriostrar; en muchos casos se prefieren las jaulas flexibles, debido a economía y a que son menos susceptibles a sufrir deformaciones permanentes durante el manejo. Para el izado de las jaulas se requiere de balancines y dos líneas de estrobos que sujetan a las jaulas (Figura 53), de tal manera que se eviten deformaciones por pandeo. Una vez habilitadas las armaduras, se soldarán los ganchos de izaje, así como los aceros de rigidez que van a permitir levantar las armaduras sin dañarlas.

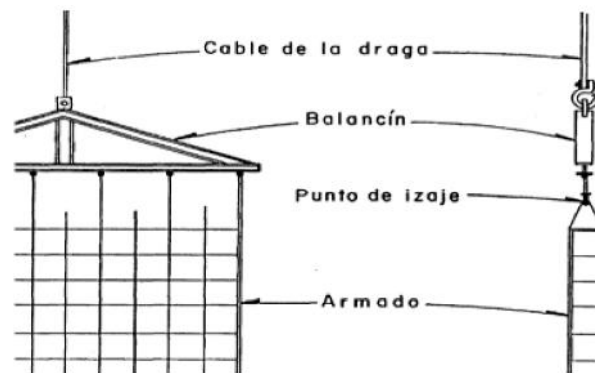


Figura 53. Manejo de armados

Uniones. La altura de las parrillas están determinadas por: la altura libre en obra, la capacidad del equipo disponible, la longitud y profundidad de los muros, las condiciones de apoyo dada por el procedimiento constructivo; si se hace necesario recurrir al corte de las parrillas, la unión de ellas deberá realizarse por medio de traslape, soldadura o del algún dispositivo mecánico. El procedimiento de unión de las parrillas empieza para levantar e introducir el primer tramo dentro de la zanja, dejando un tramo libre fuera de ella soportado con barras transversales horizontales apoyadas en los muros guía; se iza y se acopla el segundo tramo de acero de refuerzo; para hacer la unión vertical de los tramos se recurre a alguna de las siguientes uniones:

- Traslape de las varillas con la longitud de especificación y amarre con alambre.
- Traslape de las varillas con la longitud de especificación y amarre con perros o grapas "U".
- Unión de las varillas en sus puntas con conectores mecánicos de presión.
- Soldadura longitudinal de las varillas con longitud de especificaciones.

Colocación de armaduras. La maniobra se realiza lentamente de manera constante, plomeado verticalmente el armado y haciendo coincidir los centros de zanjas y parrilla; se deberá

cuidar que los armados no se asienten en el fondo de las zanjas; al terminar de introducir el acero deberá mantenerse suspendido a la elevación correcta, por lo que las parrillas deberán tener orejas o lazos de varillas para su anclaje con el brocal (Figura 54).

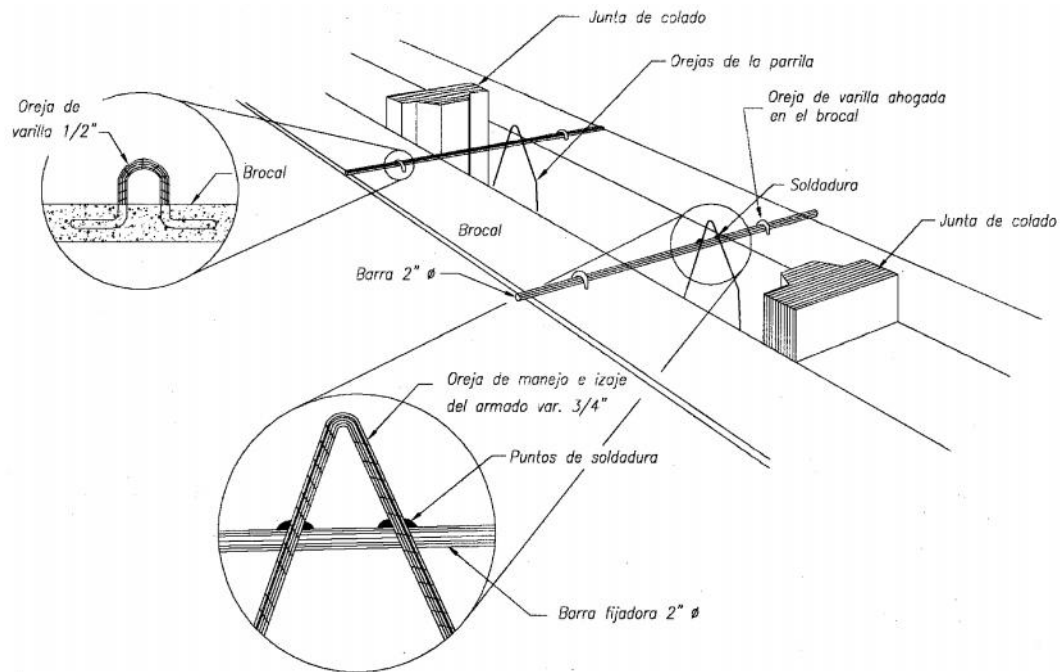
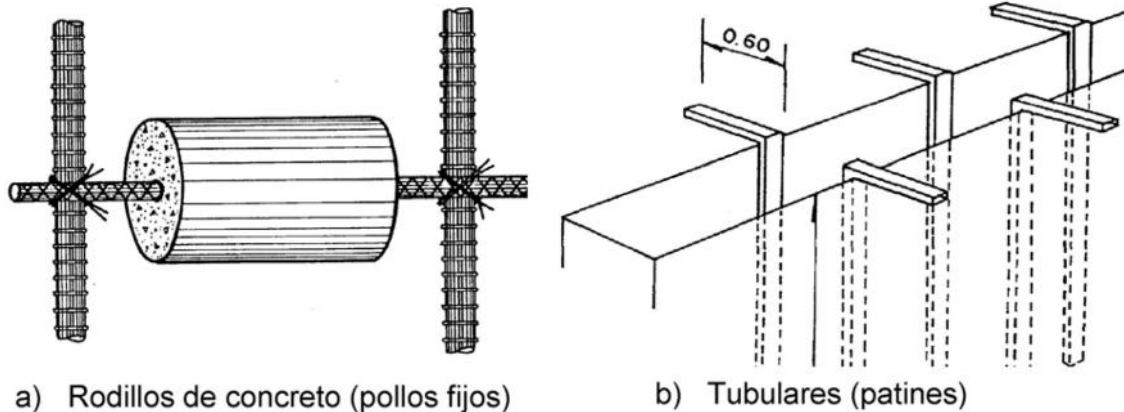


Figura 54. Orejas de fijación del acero de refuerzo

Centrado del acero de refuerzo. Actualmente es muy generalizado el empleo de rodillos de concreto comúnmente llamados pollos fijos en ambos lechos del armado para centrarlo dentro de la excavación (Figura 55). Esta técnica funciona adecuadamente cuando las paredes de la zanja son lo suficientemente resistentes para permitir que estos elementos giren sin hundirse. Para suelos muy blandos, no son recomendables, a menos que su longitud sea lo suficientemente grande para generar la capacidad de carga necesaria para no hundirse en la pared de la excavación. En caso contrario es recomendable el uso de centradores tubulares (patines) como los que se indican en la Figura 55b, hechos con perfiles PTR de 4" x 3". Se colocarán en la zanja apoyados en el brocal antes de proceder a instalar el armado y serán extraídos al momento de terminar el colado o antes si este se ha retrasado por algún imprevisto y ya se ha iniciado el fraguado del primer concreto vaciado. Terminada la excavación del primer tramo se introducen los tubos junta, de sección circular o trapecial, ligeramente inferior al ancho de la excavación.



a) Rodillos de concreto (pollos fijos)

b) Tubulares (patines)

Figura 55. Centradores

6) *Vaciado del concreto (colado)*. El concreto para un muro Milán no se vibra nunca. El colado se hace con una tubería Tremie (columna de vaciado o trompa) bajo el agua o lodo. La operación de vaciado no debe ser interrumpida: debe hacerse en una sola operación. El proceso se inicia con la introducción y armado de las líneas de tubería, de 8", 10" ó 12", según el ancho de la trinchera. El tubo debe llegar hasta 20 o 30 cm. arriba del fondo de la excavación, para vaciar la primera carga de concreto; antes de realizar el primer vaciado debe colocarse un tapón (pelota) en el interior del tubo para que sea empujado por el concreto, desaloje el lodo y sirva como seguro para evitar la penetración del lodo. A continuación se mencionan algunos puntos importantes de este procedimiento (Figura 56):

- El diámetro de la tubería debe ser entre 8" a 12" y su longitud de 3 m como máximo, Figura 1.15a. Debe ser lisa por dentro y por fuera para que el concreto fluya libremente y evitar que se atore con el armado.
- Las uniones entre los tramos deben ser herméticas; no se debe permitir que el lodo o agua penetre a través de ellas. Las cuerdas de cada tramo de tubería deben estar en perfecto estado para facilitar las maniobras de acoplado y desacoplado. Son recomendables las cuerdas de listón o trapezoidales.
- Antes de iniciar el colado se coloca un tapón deslizante dentro de cada línea de colado que puede ser una pelota de vinilo, o de poliestireno, que impida la contaminación del concreto con el lodo o agua al inicio del colado.
- El extremo inferior de las líneas de colado debe permanecer ahogado en el concreto cuando menos 1.5 m.
- El concreto debe elaborarse con agregados de 19 mm como máximo y revenimiento de 18 ± 2 cm.
- El colado debe realizarse de manera continua evitando lapsos de esperaprolongados que provoquen taponamientos en la tubería por el fraguado inicial del concreto.
- El lodo será bombeado en superficie del panel a la misma cadencia que se vacía el concreto y será enviado por la red de tubos a la central para ser reciclado y reutilizado en perforaciones posteriores.

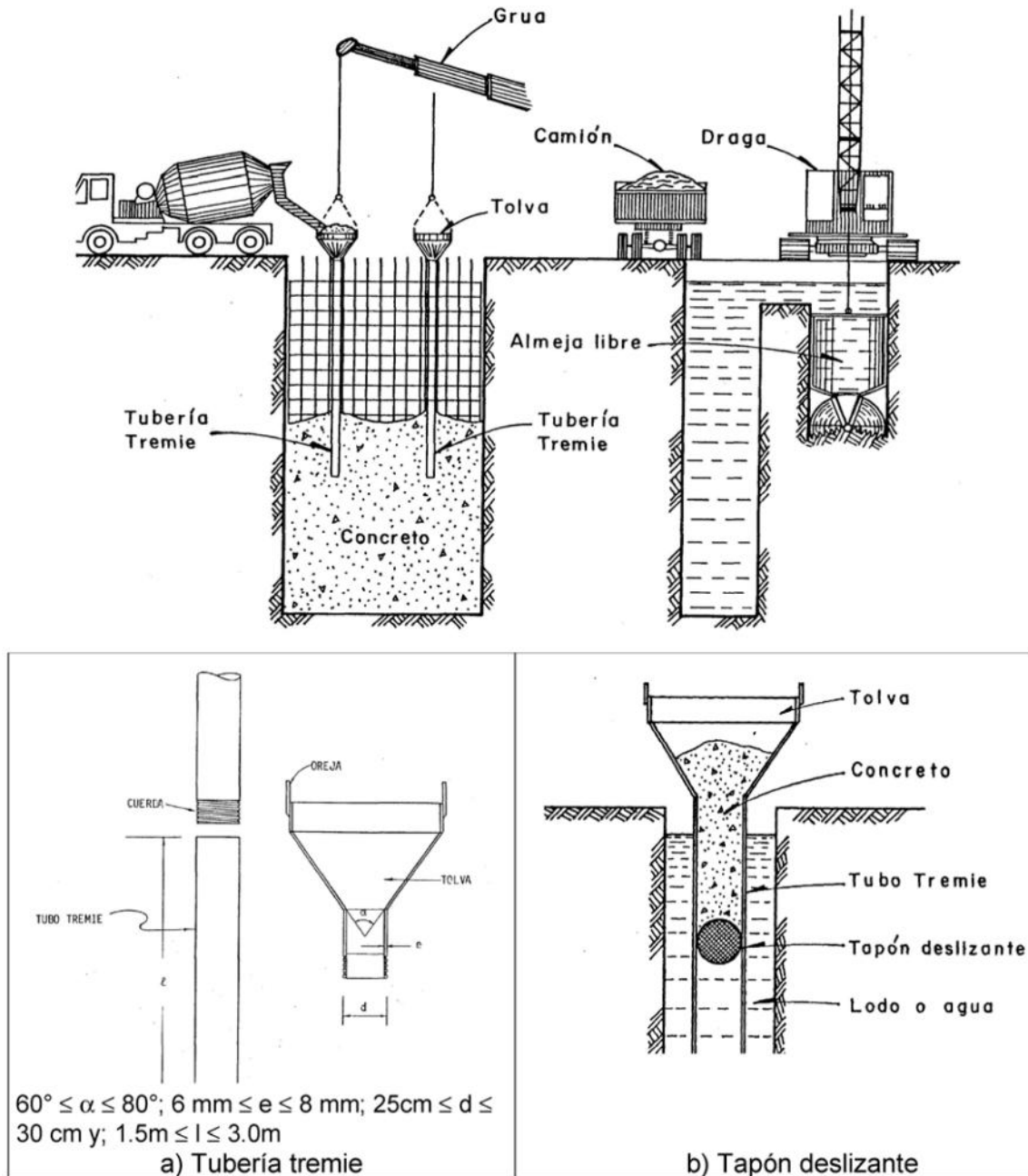


Figura 56. Detalle de colado

- 8) *Extracción de la Junta.* Cuando ha empezado el fraguado inicial del concreto en uno de los módulos del muro (lo cual empieza unas 2 horas después de su colado), debe levantarse axialmente la junta unos 2cm con la finalidad de romper la adherencia. El tiempo para iniciar la excavación del siguiente panel dependerá de la protección y ancho que proporciona la junta. La maniobra para retirar la junta, requiere de una grúa capaz de jalar y de aplicar una fuerza horizontal ligera (Figura 57).

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.

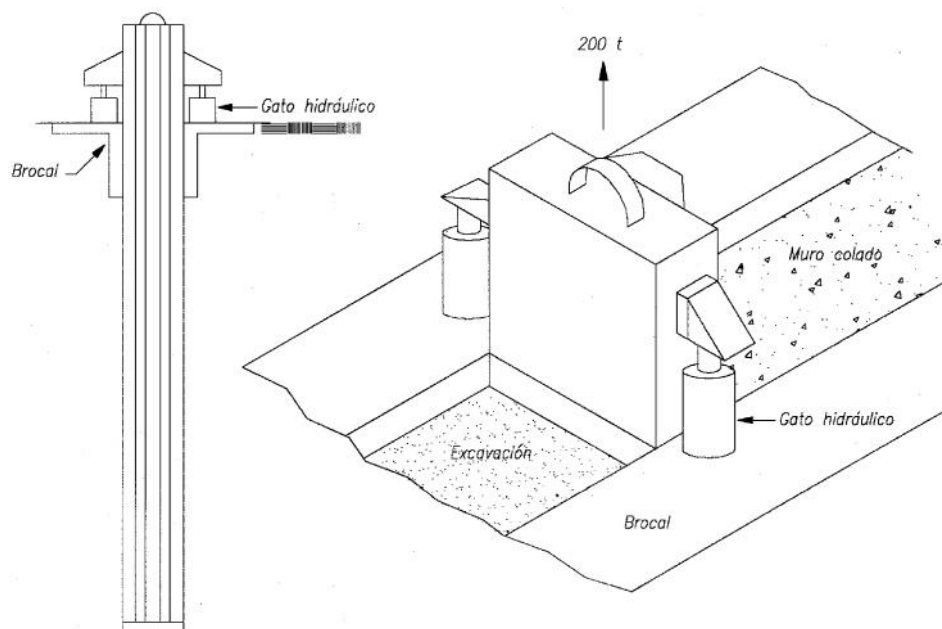


Figura 57. Extracción de la junta de colado

9) Controles. Durante las operaciones antes citadas, debe prestarse atención a los puntos siguientes:

- 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.

4.5 Construcción del brocal definitivo

Concluido el muro Milán se procede al retiro del brocal interior y a realizar mediante retroexcavadora una excavación perimetral hasta un metro a bajo de la parte superior del muro Milán que servirá tanto para la construcción del faldón como para poder realizar la demolición (descabece) del muro Milán para retirar el material contaminado.

Se procede a la colocación del acero de refuerzo previamente habilitado, en los diámetros y longitudes indicados en los planos de proyecto tanto en aleros como faldones del brocal, cuidando en todo momento que se coloquen los separadores para asegurar los recubrimientos

especificados. Se verifican topográficamente los niveles del acero de refuerzo, asegurándose que se cumple con los niveles de proyecto y se suministra, habilita y coloca la cimbra aparenten en brocal.

Se inicia la construcción de la trabe de coronamiento y el brocal exterior definitivo (Figura 58).

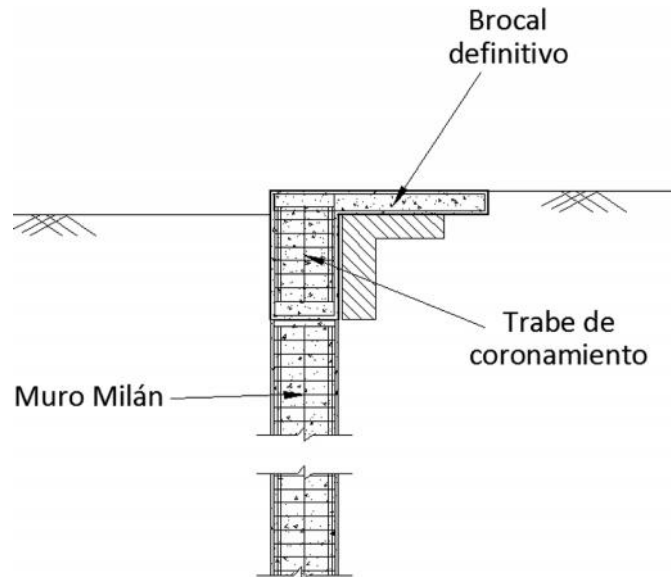


Figura 58. Brocal definitivo

4.6 Instrumentación

En el sitio de la lumbrera se debe instalar una estación piezométrica (EP) que puede ser con piezómetros de cuerda vibrante, en los estratos arenosos en las profundidades que se muestran en la Tabla 4, con el propósito de monitorear las variaciones de la presión de poro antes, durante y después de la construcción de la lumbrera.

También se instalará un pozo de observación (PO) para monitorear el nivel de aguas freáticas superficial. Asimismo, se instalarán bancos de nivel flotante (BNF) en un sitio aledaño a la lumbrera con el objetivo de llevar un control topográfico.

De igual manera se deberán instalar inclinómetros para verificar el movimiento vertical del muro Milán durante la excavación del núcleo central.

Finalmente se instalará un banco de nivel profundo el cual es punto de referencia fijo dado que no sufrirá los asentamientos regionales que pudieran estar ocurriendo en la superficie del terreno.

En la Figura 59 se muestra el arreglo del sistema de instrumentación.

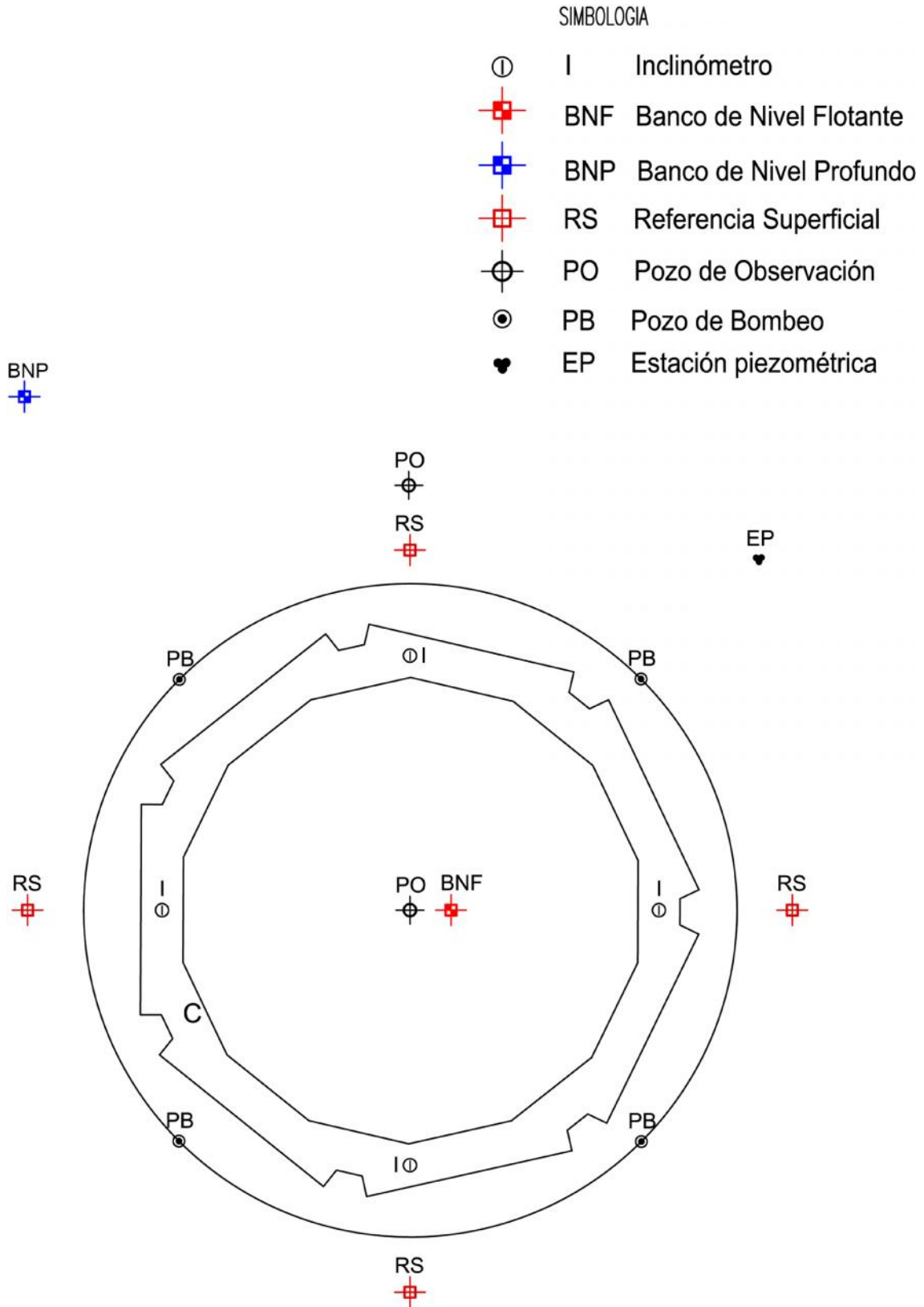


Figura 59. Instrumentación requerida para la lumbrera

4.7 Excavación del núcleo central

Se entiende por núcleo central al suelo que se encuentra en el interior de la lumbrera confinado por el muro Milán. La excavación del núcleo es un procedimiento a cielo abierto y se podrá iniciar una vez haya terminado la trabe de coronamiento y su brocal definitivo.

La excavación del núcleo central se llevará a cabo con retroexcavadora, la rezaga se extraerá mediante grúa, los últimos metros de excavación se realizarán por medios manuales para afinar la superficie para la construcción de la losa de fondo.

4.7.1 Apuntalamiento

Los muros circulares tienen la particularidad de que no pueden convergir libremente cuando se les carga externamente. Considérese un muro circular delgado, con un radio R , sujeto a una presión axisimétrica p . Un diagrama de equilibrio de fuerzas muestra que la reacción a la presión externa produce una fuerza de compresión en el muro que resiste la tendencia a convergir. En la Figura 60 se muestra un diagrama de cuerpo libre de un segmento de muro (Referencia 10).

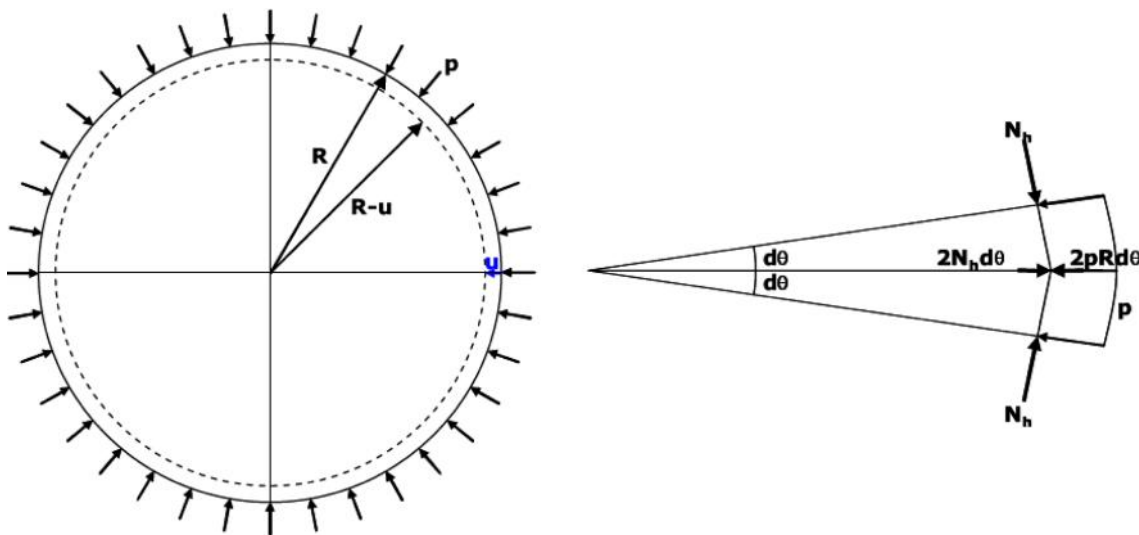


Figura 60. Diagrama de cuerpo libre de un segmento circular de muro

La rigidez circunferencial que relaciona la presión aplicada con el desplazamiento radial puede ser definida como:

$$p = \frac{E \cdot t \cdot \Delta R}{R^2} \tag{34}$$

donde p presión axisimétrica
 E módulo de Young del material del muro
 R radio del muro
 t espesor

Esta relación obtenida para un anillo se usa para un muro circular tridimensional bajo presiones axisimétricas.

Basado en los comentarios anteriores, puede concluirse que los muros circulares tienen ventajas comparados con los muros planos, al no necesitar anclas o apuntalamiento interior; los trabajos de excavación en el interior se llevan a cabo con mayor eficiencia.

Dado que las fuerzas radiales de compresión proveen un soporte rígido continuo al muro, el momento flexionante y la fuerza cortante en el muro se mantienen generalmente bajas, resultando en un refuerzo relativamente menor.

4.8 Construcción de la losa de fondo

Una vez alcanzado el nivel máximo de excavación se colocará un firme de concreto pobre de 5 cm de espesor.

Posteriormente se construirá la losa de fondo de 2.0 m de espesor.

4.9 Anclaje de la losa de fondo con el muro Milán

En la Figura 61 se muestra el anclaje de la losa de fondo con el muro Milán.

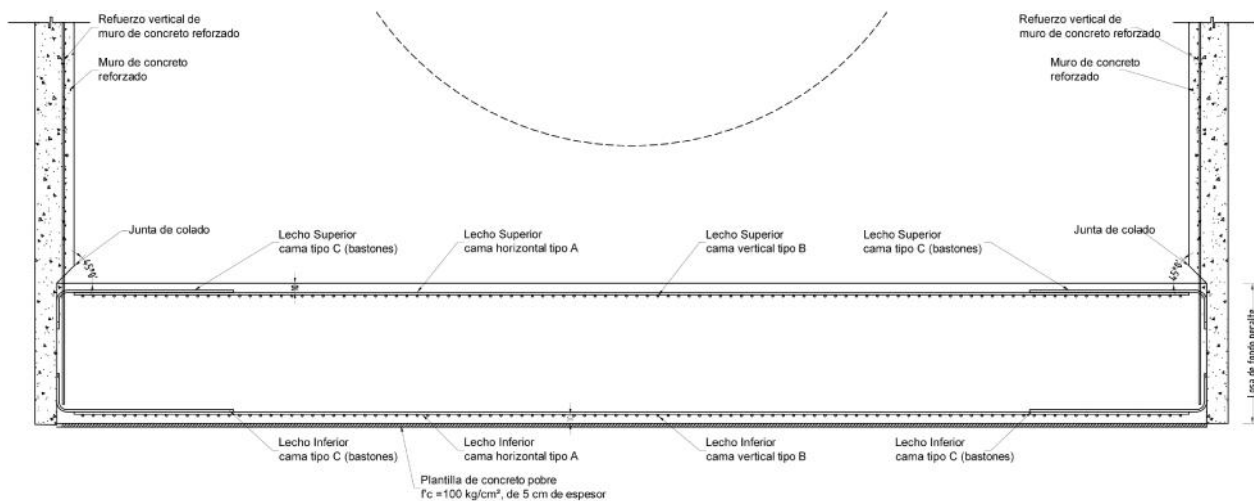


Figura 61. Conexión losa - muro

5. CONCLUSIONES

Este documento se ha desarrollado con el interés de presentar el proceso de diseño que demanda una lumbrera proyectada en suelos blandos, como los del Valle de México, donde la resistencia al esfuerzo cortante y los módulos de deformación son desfavorables.

Inicialmente se hace notar la importancia de utilizar técnicas adecuadas de exploración geotécnica en suelos blandos para la correcta obtención de los parámetros de diseño. Se ha presentado al Cono Eléctrico como una herramienta adecuada para la exploración de este tipo de suelos, en conjunto con el muestreo inalterado selectivo. Con los resultados de los sondeos de Cono Eléctrico es posible detectar detalles estratigráficos, como los delgados lentes duros característicos de los suelos del Valle de México, útiles para la instalación de instrumentos de piezometría para el monitoreo de la presión de poro.

Con base en resultados de trabajos de exploración geotécnica y ensayos del laboratorio para un sitio en el valle de México, se ha construido el modelo geotécnico para la construcción hipotética de una lumbrera de 13 m de diámetro y 35 m de profundidad. Esta información se ha complementado con datos de piezometría, donde se observa un fuerte abatimiento de la presión de poro por efecto del bombeo profundo a que está sujeta la ciudad de México.

En este trabajo se presentan los criterios y análisis que requiere el diseño geotécnico de la lumbrera, ante los diferentes mecanismos de falla durante su proceso constructivo y durante su operación. Los resultados de estas revisiones, a través de los factores de seguridad obtenidos y su comparación contra los factores mínimos admisibles, se resumen a continuación:

Tabla 21 Factores de seguridad contra la falla de la excavación al final de la excavación

| MECANISMO DE FALLA | $(FS)_{\min}$ | $(FS)_{\text{calculado}}$ |
|--|-------------------------------|---------------------------|
| Falla general del fondo | $(FS)_f \geq 1.7$ | 1.33 |
| Falla general por subpresión | $(FS)_{\text{sub}} \geq 1.5$ | 0.67 |
| Falla por empotramiento de la pata | $(FS)_p \geq 1.5$ | 1.46 |
| Falla por Flotación, condiciones estáticas | $(FS)_{\text{flot}} \geq 1.4$ | 4.17 |
| Falla por Flotación, condiciones sísmicas | $(FS)_{\text{flot}} \geq 1.1$ | 1.66 |
| Zanja con lodo | $(FS) > \geq 1.95$ | 1.40 |
| Zanja con concreto | $(FS) > \geq 1.95$ | 0.95 |
| Salida del escudo | $(FS)_{\text{esc}} \geq 2.0$ | 1.8 |

Como se observa, es necesario implementar un sistema de bombeo que mantenga abatido la presión del agua por debajo del nivel de excavación para evitar la falla por subpresión. Se deberá también realizar un mejoramiento del suelo para evitar una falla por extrusión a la salida de la tuneladora. De igual manera, se presentará un ensanchamiento en las paredes de la excavación ocasionado por la presión ejercida del concreto hacia las paredes, esta condición se podrá controlar con la velocidad de colado.

Se han establecido los esfuerzos horizontales actuando sobre la lumbrera, tanto para la etapa de construcción, como de servicio.

Complementariamente se ha realizado la determinación de los elementos mecánicos bajo condiciones accidentales por sismo, necesarios para el diseño estructural.

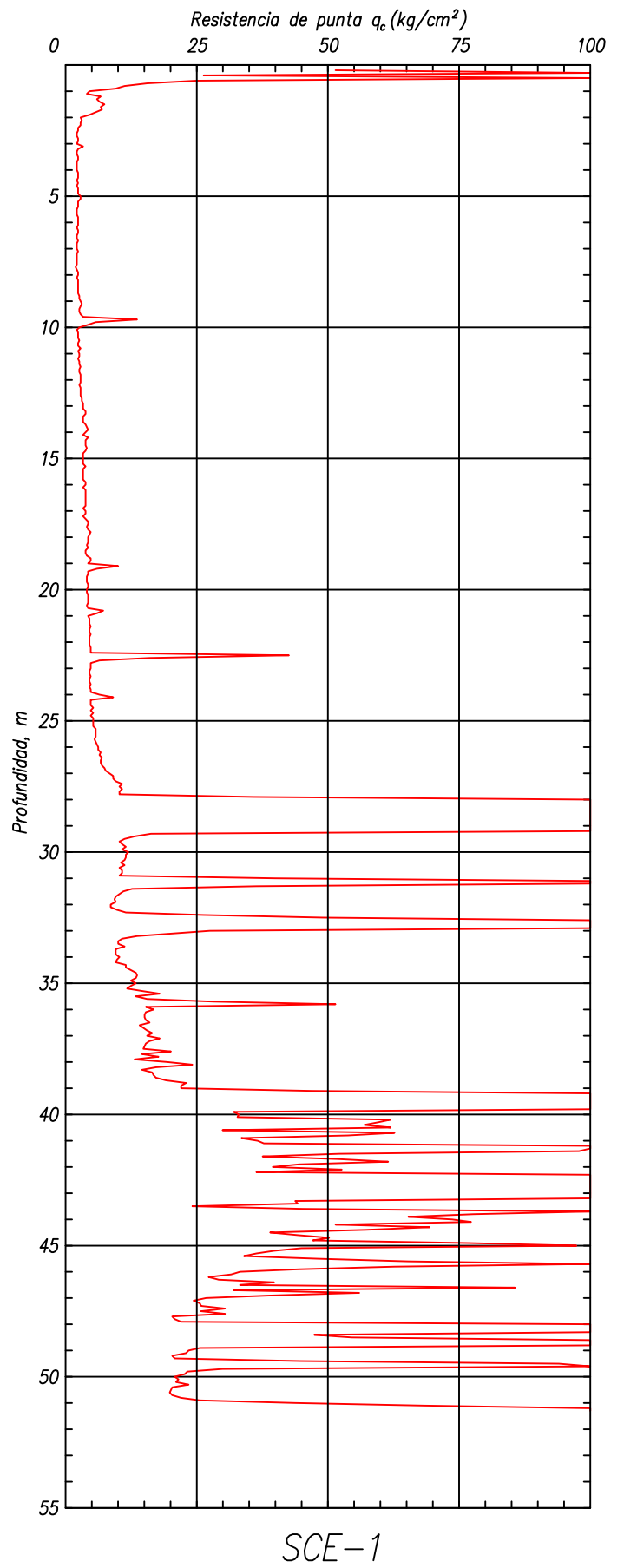
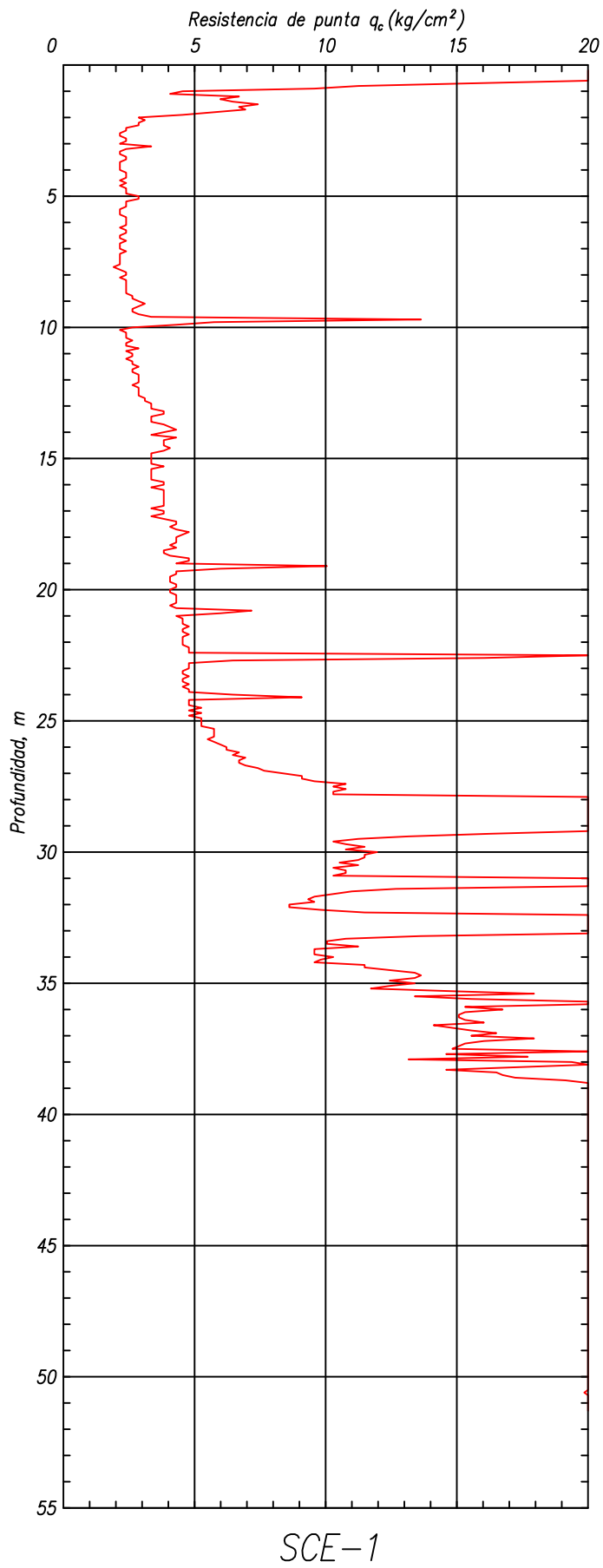
Para el estudio del comportamiento de la lumbrera se ha hecho uso de análisis de elemento finito, estableciendo los esfuerzos y deformaciones esperados durante la secuencia de construcción y hasta la operación.

Con base en los resultados obtenidos de la investigación y desarrollo de este trabajo, se considera que los criterios de diseño aplicados en México para el análisis de lumbreras en suelos blandos, son confiables y permiten garantizar las condiciones de seguridad que este tipo de estructuras demandan. Sin embargo, se destaca que es necesario contar con mejores criterios de diseño sísmico para lumbreras y, en general, para estructuras enterradas.

6. REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

1. Santoyo, E., *et al* (2005), *Síntesis geotécnica de la cuenca del Valle de México*. México, TGC Geotecnia.
2. Tamez, E., *et al* (1987), *Manual de diseño geotécnico*. Vol 1, COVITUR, D.D.F
3. “Reglamento de construcciones para el Distrito Federal” (2004), *Diario Oficial de la Federación*, 2ª edición.
4. Holguín, *et al* (1992), *Diseño geotécnico de cimentaciones*, México, TGC Geotecnia.
5. Santoyo, *et. al.* (1989), *El Cono en la Exploración Geotécnica*. México, TGC Geotecnia.
6. Tamez González, Enrique (2001), *Ingeniería de Cimentaciones*, México, TGC Geotecnia.
7. Zeevaert, L (1982). *Foundation Engineering for Difficult Subsoil Conditions*. Van Nostrand Reinhold New York.
8. Tamez, E., *et al* (1997). *Diseño geotécnico de túneles*, México, TGC Geotecnia.
9. H. G., Poulos and E. H., Davis (1991). *Elastic Solutions for Soil and Rock Mechanics*. Centre For Geotechnical Research. The University of Sydney.

ANEXO 1
SONDEO DE EXPLORACIÓN

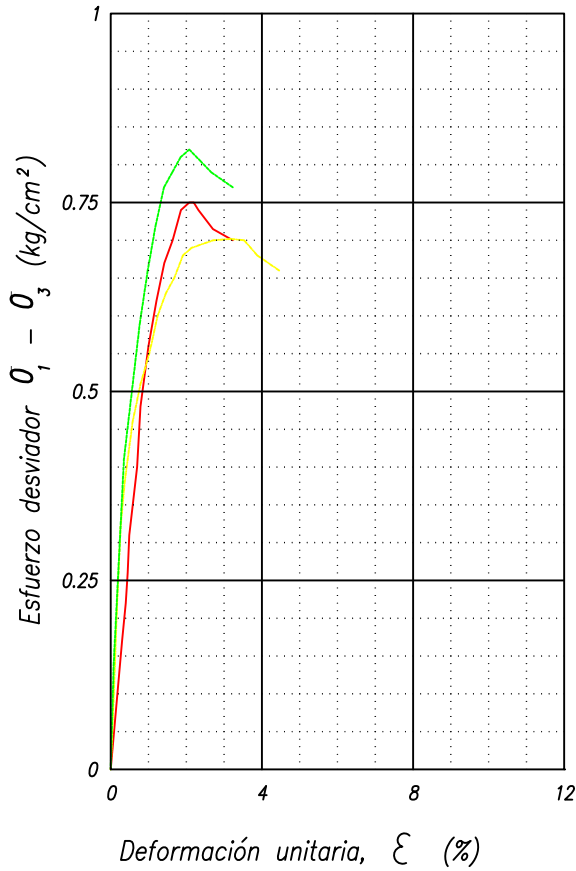


ANEXO 2

PRUEBAS DE LABORATORIO

PRUEBA TRIAXIAL UU

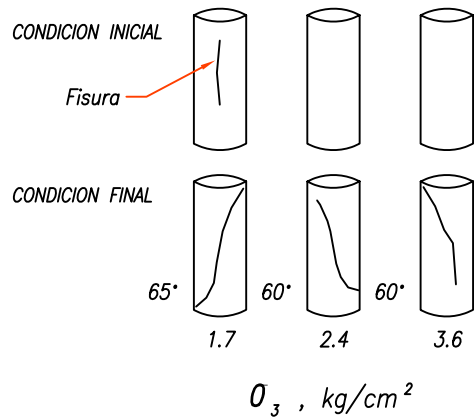
OBRA : _____



DESCRIPCION DEL MATERIAL

Arcilla café y gris olivo,
con fisura natural

| SIMBOLO | O_3 kg/cm ² | E_{50} kg/cm ² |
|------------|-----------------------------|--------------------------------|
| — (Red) | 1.7 | 56 |
| — (Yellow) | 2.4 | 54 |
| — (Green) | 3.6 | 61 |



| SONDEO | PROF m | Tx | O_3 kg/cm ² | O_d kg/cm ² | w_i % | w_f % | G_s | e_i | e_f | Sr_i % | Sr_f % | γ_n kg/m ³ |
|--------|-----------|----|-----------------------------|-----------------------------|------------|------------|-------|-------|-------|-------------|-------------|---------------------------------|
| SMS-1 | 1.7 | UU | 1.7 | 0.75 | 200 | 200 | 3.14 | 6.40 | 6.40 | 99 | 99 | 1278 |
| | | | 2.4 | 0.70 | 171 | 171 | 3.14 | 5.78 | 5.78 | 93 | 93 | 1259 |
| | | | 3.6 | 0.82 | 197 | 197 | 3.14 | 6.34 | 6.34 | 98 | 98 | 1275 |

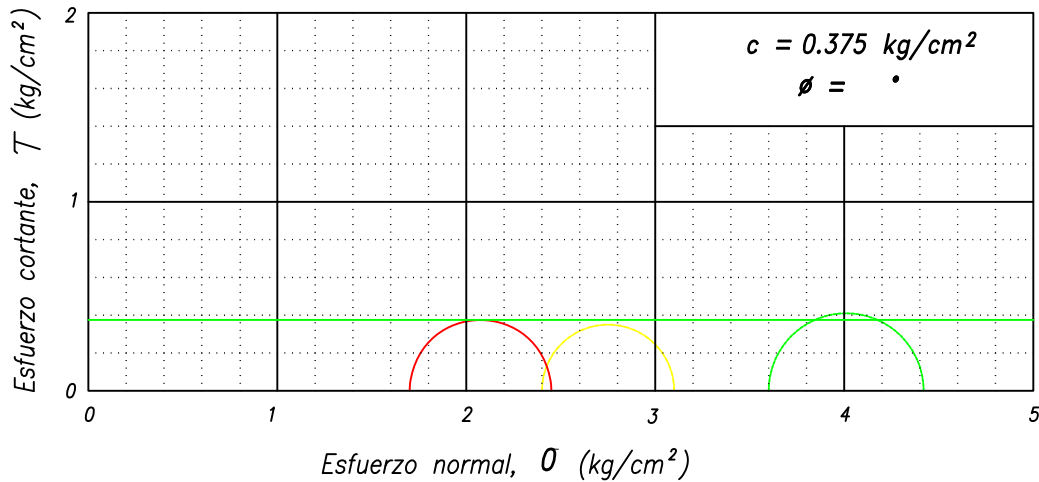
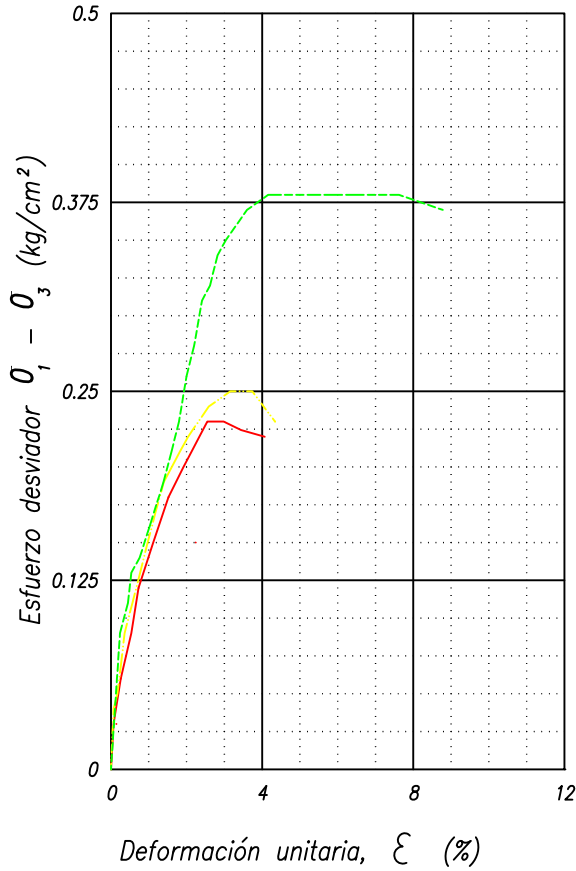


Figura 2-1

PRUEBA TRIAXIAL UU

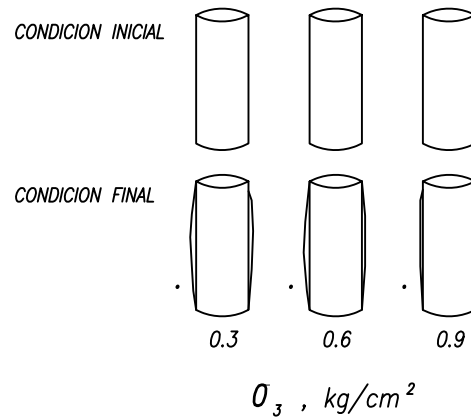
OBRA : _____



DESCRIPCION DEL MATERIAL

Arcilla café contaminada de aguas negras

| SIMBOLO | σ_3 kg/cm ² | E_{50} kg/cm ² |
|------------|----------------------------------|--------------------------------|
| — (Red) | 0.3 | 14 |
| — (Yellow) | 0.6 | 16 |
| — (Green) | 0.9 | 17 |



| SONDEO | PROF m | T _x | σ_3 kg/cm ² | σ_d kg/cm ² | w_i % | w_f % | G_s | e_i | e_f | Sr_i % | Sr_f % | γ_n kg/m ³ |
|--------|-----------|----------------|----------------------------------|----------------------------------|------------|------------|-------|-------|-------|-------------|-------------|---------------------------------|
| SMS-1 | 2.5 | UU | 0.3 | 0.23 | 235 | 235 | 2.53 | 6.36 | 6.36 | 94 | 94 | 1058 |
| | | | 0.6 | 0.25 | 227 | 227 | 2.53 | 5.95 | 5.95 | 96 | 96 | 1192 |
| | | | 0.9 | 0.38 | 223 | 223 | 2.53 | 5.54 | 5.54 | 100 | 100 | 1251 |

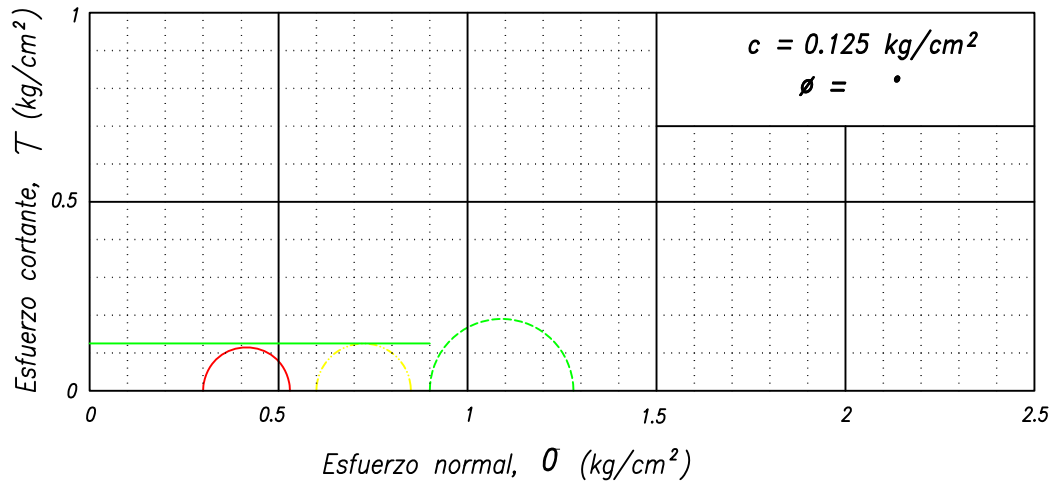
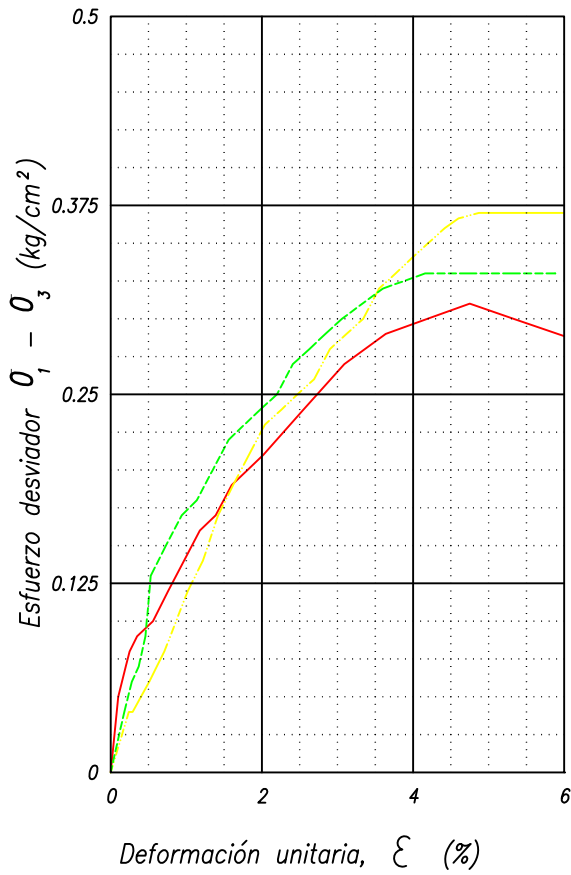


Figura 2-2

PRUEBA TRIAXIAL UU

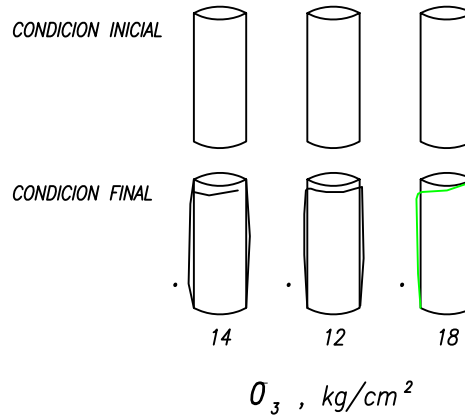
OBRA : _____



DESCRIPCION DEL MATERIAL

Arcilla café rojizo, con manchas gris olivo y oscuro, con lentes de ceniza volcánica

| SIMBOLO | σ_3 kg/cm ² | E_{50} kg/cm ² |
|---------|----------------------------------|--------------------------------|
| — | 0.3 | 14 |
| — | 0.6 | 12 |
| — | 0.9 | 18 |



| SONDEO | PROF m | T _x | σ_3 kg/cm ² | σ_d kg/cm ² | w_i % | w_f % | G_s | e_i | e_f | Sr_i % | Sr_f % | γ_n kg/m ³ |
|--------|-----------|----------------|----------------------------------|----------------------------------|------------|------------|-------|-------|-------|-------------|-------------|---------------------------------|
| SMS-1 | 3.5 | UU | 14 | 0.31 | 221 | 221 | 2.64 | 5.90 | 5.90 | 99 | 99 | 1233 |
| | | | 12 | 0.37 | 225 | 225 | 2.64 | 5.79 | 5.79 | 100 | 100 | 1270 |
| | | | 18 | 0.33 | 212 | 212 | 2.64 | 5.60 | 5.60 | 100 | 100 | 1254 |

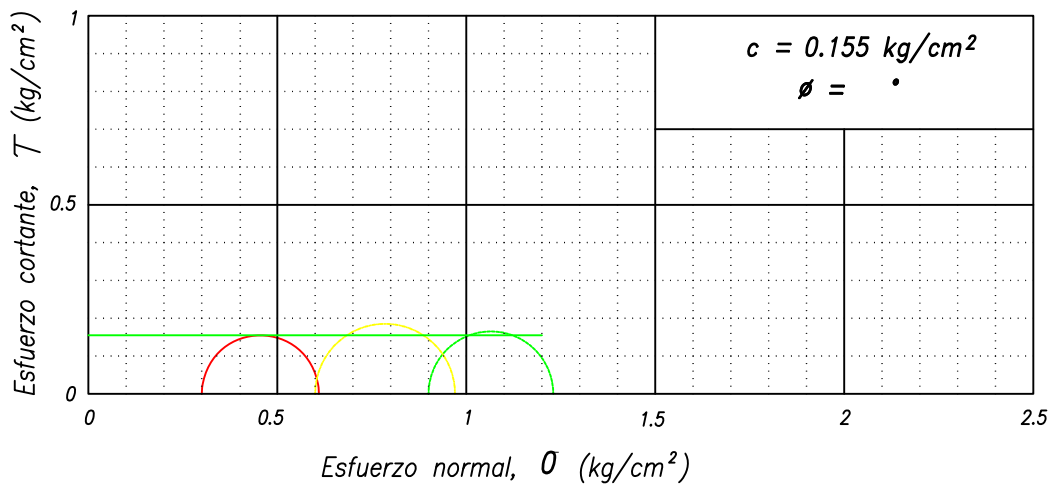
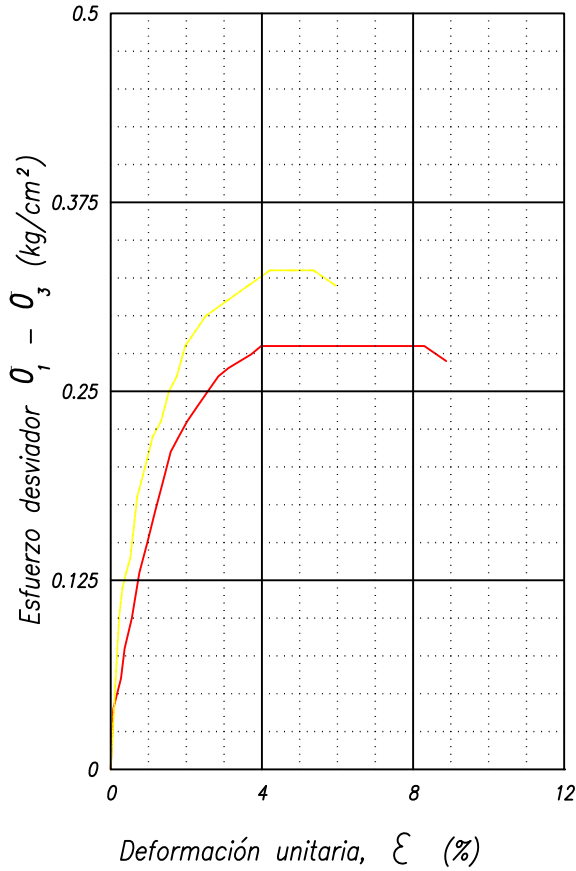


Figura 2-3

PRUEBA TRIAXIAL UU

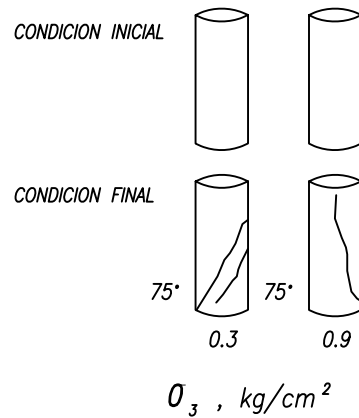
OBRA : _____



DESCRIPCION DEL MATERIAL

Arcilla roja oscura fragil con fisuras naturales

| SIMBOLO | O_3 kg/cm ² | E_{50} kg/cm ² |
|---------|-----------------------------|--------------------------------|
| — | 0.3 | 16 |
| — | 0.9 | 22 |



| SONDEO | PROF m | Tx | O_3 kg/cm ² | O_d kg/cm ² | w_i % | w_f % | G_s | e_i | e_f | Sr_i % | Sr_f % | γ_n kg/m ³ |
|--------|-----------|----|-----------------------------|-----------------------------|------------|------------|-------|-------|-------|-------------|-------------|---------------------------------|
| SMS-1 | 4.5 | UU | 0.3 | 0.28 | 233 | 233 | 2.52 | 5.78 | 5.78 | 100 | 100 | 1283 |
| | | | 0.9 | 0.33 | 245 | 245 | 2.52 | 6.20 | 6.20 | 99 | 99 | 1202 |

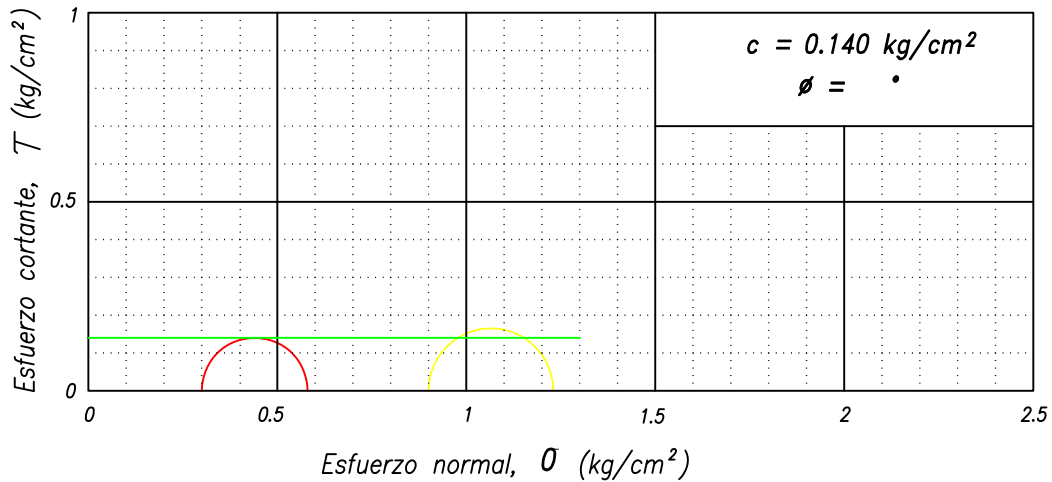
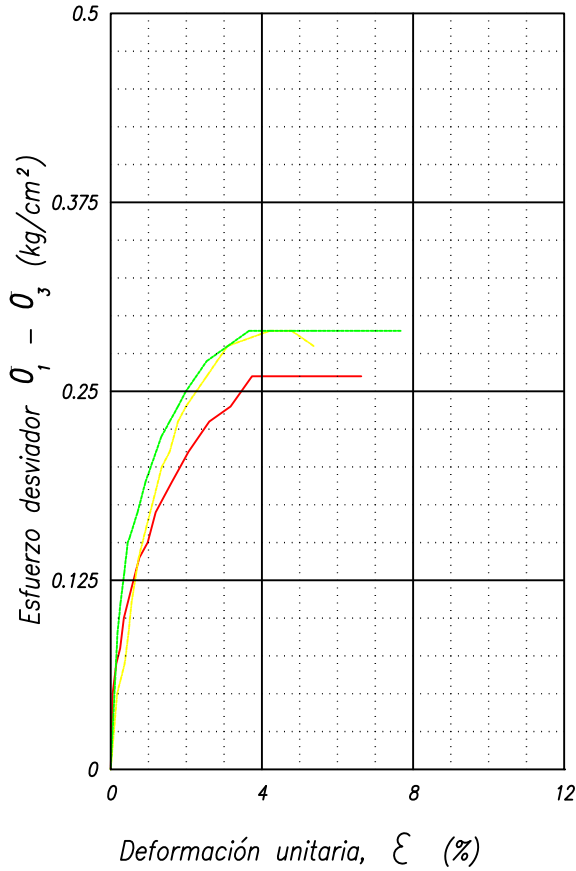


Figura 2-4

PRUEBA TRIAXIAL UU

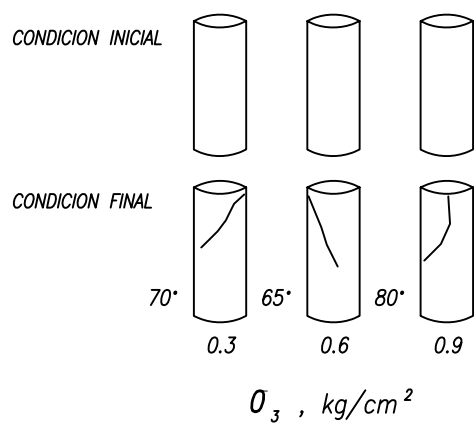
OBRA : _____



DESCRIPCION DEL MATERIAL

Arcilla café rojizo con manchas olivo y grises

| SIMBOLO | σ_3 kg/cm ² | E_{50} kg/cm ² |
|----------------|----------------------------------|--------------------------------|
| — (Red) | 0.3 | 15 |
| - - - (Yellow) | 0.6 | 17 |
| - - - (Green) | 0.9 | 21 |



| SONDEO | PROF m | T _x | σ_3 kg/cm ² | σ_d kg/cm ² | w_i % | w_f % | G_s | e_i | e_f | Sr_i % | Sr_f % | γ_n kg/m ³ |
|--------|-----------|----------------|----------------------------------|----------------------------------|------------|------------|-------|-------|-------|-------------|-------------|---------------------------------|
| SMS-1 | 5.5 | UU | 0.3 | 0.26 | 189 | 189 | 2.67 | 4.99 | 4.99 | 100 | 100 | 1295 |
| | | | 0.6 | 0.29 | 189 | 189 | 2.67 | 5.24 | 5.24 | 96 | 96 | 1240 |
| | | | 0.9 | 0.29 | 197 | 197 | 2.67 | 5.24 | 5.24 | 100 | 100 | 1277 |

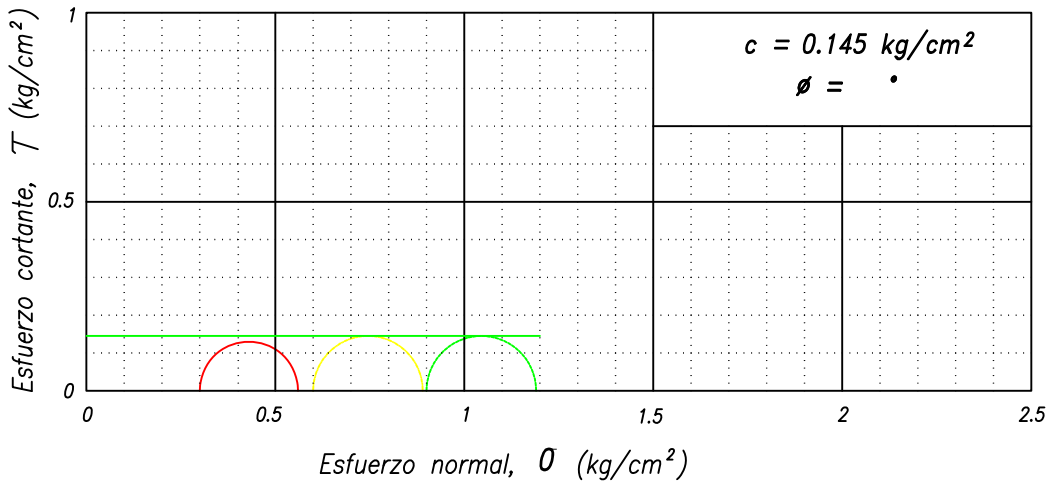
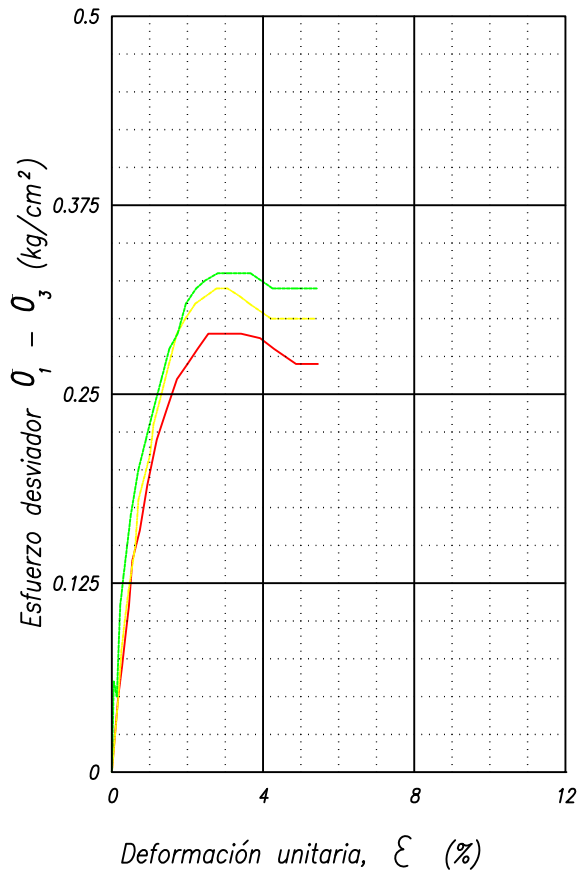


Figura 2-5

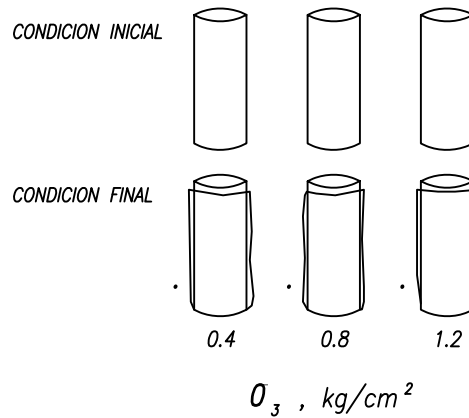
PRUEBA TRIAXIAL UU

OBRA : _____



| DESCRIPCION DEL MATERIAL | |
|--|--|
| Arcilla café olivo, con manchas negras, fragil | |

| SIMBOLO | σ_3 kg/cm ² | E_{50} kg/cm ² |
|------------|----------------------------------|--------------------------------|
| — (red) | 0.4 | 20 |
| — (yellow) | 0.8 | 21 |
| — (green) | 1.2 | 24 |



| SONDEO | PROF m | T_x | σ_3 kg/cm ² | σ_d kg/cm ² | w_i % | w_f % | G_s | e_i | e_f | Sr_i % | Sr_f % | γ_n kg/m ³ |
|--------|-----------|-------|----------------------------------|----------------------------------|------------|------------|-------|-------|-------|-------------|-------------|---------------------------------|
| SMS-1 | 6.5 | UU | 0.4 | 0.29 | 256 | 256 | 2.41 | 5.89 | 5.89 | 100 | 100 | 1251 |
| | | | 0.8 | 0.32 | 219 | 219 | 2.41 | 5.16 | 5.16 | 100 | 100 | 1256 |
| | | | 1.2 | 0.33 | 244 | 244 | 2.41 | 5.81 | 5.81 | 100 | 100 | 1222 |

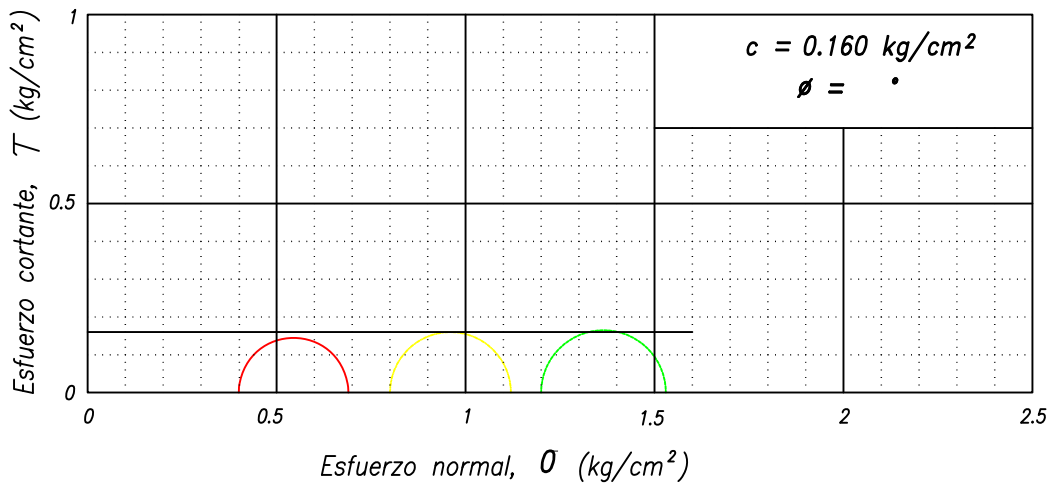
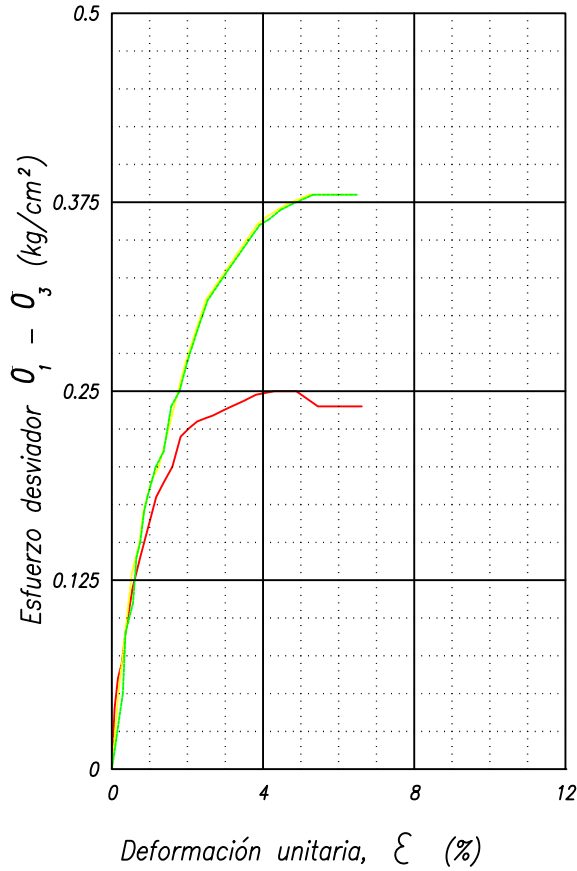


Figura 2-6

PRUEBA TRIAXIAL UU

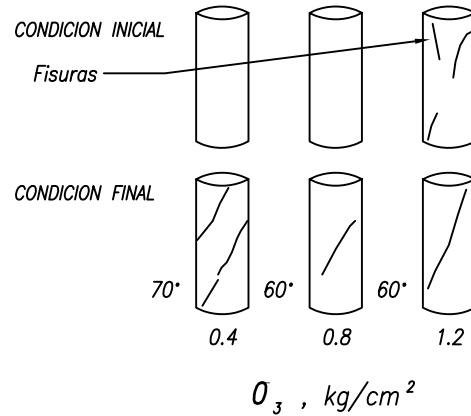
OBRA : _____



DESCRIPCION DEL MATERIAL

Arcilla café olivo claro con fisuras naturales y manchas negras

| SIMBOLO | O_3 kg/cm ² | E_{50} kg/cm ² |
|---------|-----------------------------|--------------------------------|
| — | 0.4 | 17 |
| — | 0.8 | 18 |
| — | 1.2 | 19 |



| SONDEO | PROF m | T_x | O_3 kg/cm ² | O_d kg/cm ² | w_i % | w_f % | G_s | e_i | e_f | Sr_i % | Sr_f % | γ_n kg/m ³ |
|--------|-----------|-------|-----------------------------|-----------------------------|------------|------------|-------|-------|-------|-------------|-------------|---------------------------------|
| SMS-1 | 7.5 | UU | 0.4 | 0.25 | 292 | 292 | 2.6 | 7.68 | 7.68 | 99 | 99 | 1176 |
| | | | 0.8 | 0.38 | 303 | 303 | 2.6 | 7.86 | 7.86 | 100 | 100 | 1183 |
| | | | 1.2 | 0.38 | 293 | 293 | 2.6 | 7.72 | 7.72 | 99 | 99 | 1173 |

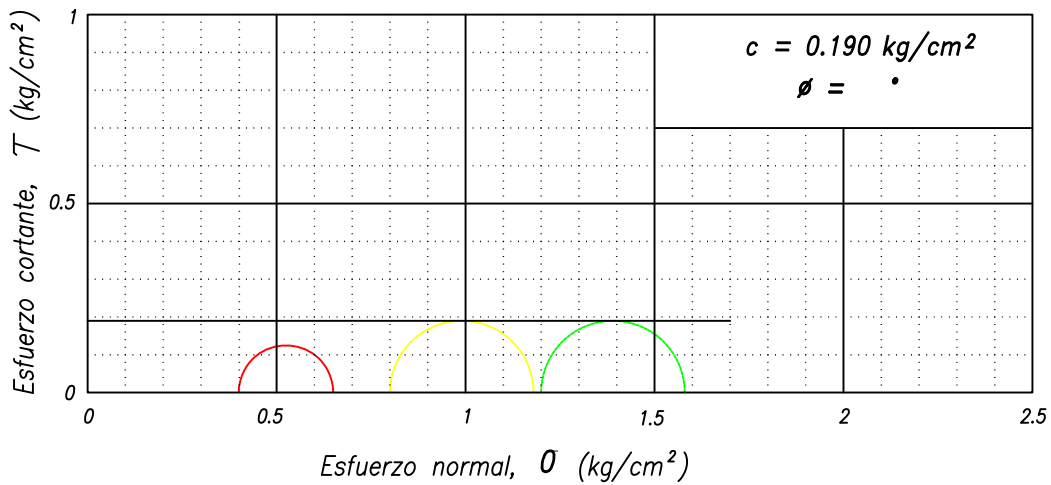
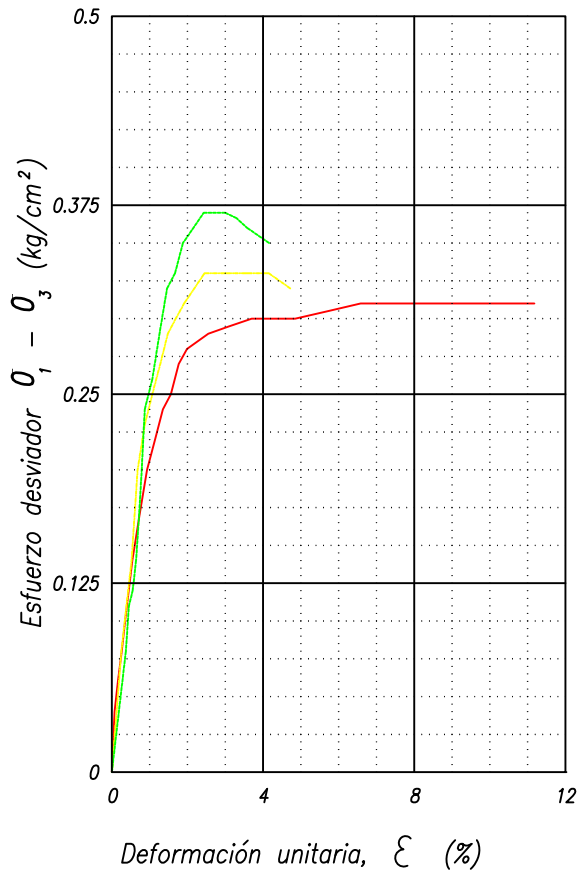


Figura 2-7

PRUEBA TRIAXIAL UU

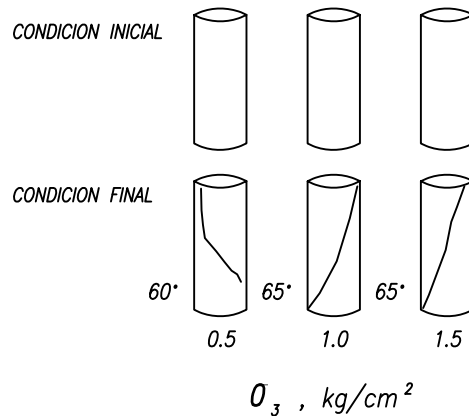
OBRA : _____



DESCRIPCION DEL MATERIAL

Arcilla café olivo, con manchas gris olivo

| SIMBOLO | σ_3 kg/cm ² | E_{50} kg/cm ² |
|---------|----------------------------------|--------------------------------|
| — | 0.5 | 22 |
| - - - | 1.0 | 23 |
| · · · | 1.5 | 24 |



| SONDEO | PROF m | T _x | σ_3 kg/cm ² | σ_d kg/cm ² | w_i % | w_f % | G_s | e_i | e_f | Sr_i % | Sr_f % | γ_n kg/m ³ |
|--------|-----------|----------------|----------------------------------|----------------------------------|------------|------------|-------|-------|-------|-------------|-------------|---------------------------------|
| SMS-1 | 8.7 | UU | 0.5 | 0.31 | 249 | 249 | 2.6 | 6.39 | 6.39 | 100 | 100 | 1231 |
| | | | 1.0 | 0.33 | 254 | 254 | 2.6 | 6.62 | 6.62 | 100 | 100 | 1211 |
| | | | 1.5 | 0.37 | 266 | 266 | 2.6 | 6.80 | 6.80 | 100 | 100 | 1220 |

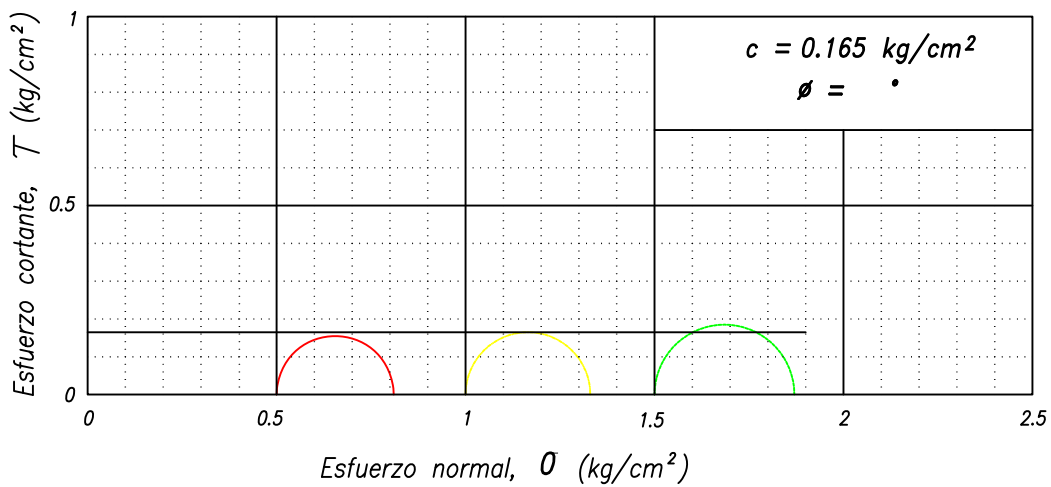
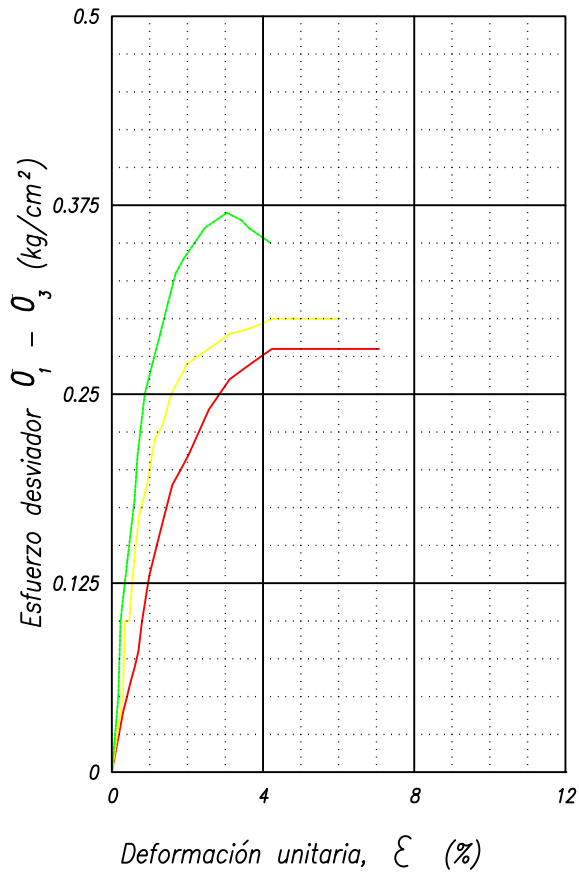


Figura 2-8

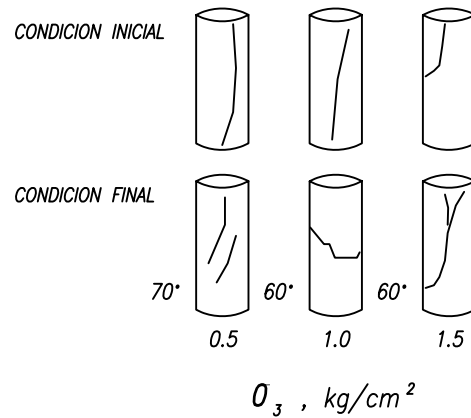
PRUEBA TRIAXIAL UU

OBRA : _____



| DESCRIPCION DEL MATERIAL | |
|---|--|
| Arcilla café rojizo, con manchas gris olivo | |

| SIMBOLO | O_3 kg/cm ² | E_{50} kg/cm ² |
|---------|-----------------------------|--------------------------------|
| — | 0.5 | 13 |
| — | 1.0 | 20 |
| — | 1.5 | 25 |



| SONDEO | PROF m | T_x | O_3 kg/cm ² | O_d kg/cm ² | w_i % | w_f % | G_s | e_i | e_f | Sr_i % | Sr_f % | γ_n kg/m ³ |
|--------|-----------|-------|-----------------------------|-----------------------------|------------|------------|-------|-------|-------|-------------|-------------|---------------------------------|
| SMS-1 | 9.3 | UU | 0.5 | 0.28 | 234 | 234 | 2.6 | 6.10 | 6.10 | 100 | 100 | 1226 |
| | | | 1.0 | 0.30 | 191 | 191 | 2.6 | 5.25 | 5.25 | 95 | 95 | 1213 |
| | | | 1.5 | 0.37 | 215 | 215 | 2.6 | 5.59 | 5.59 | 100 | 100 | 1244 |

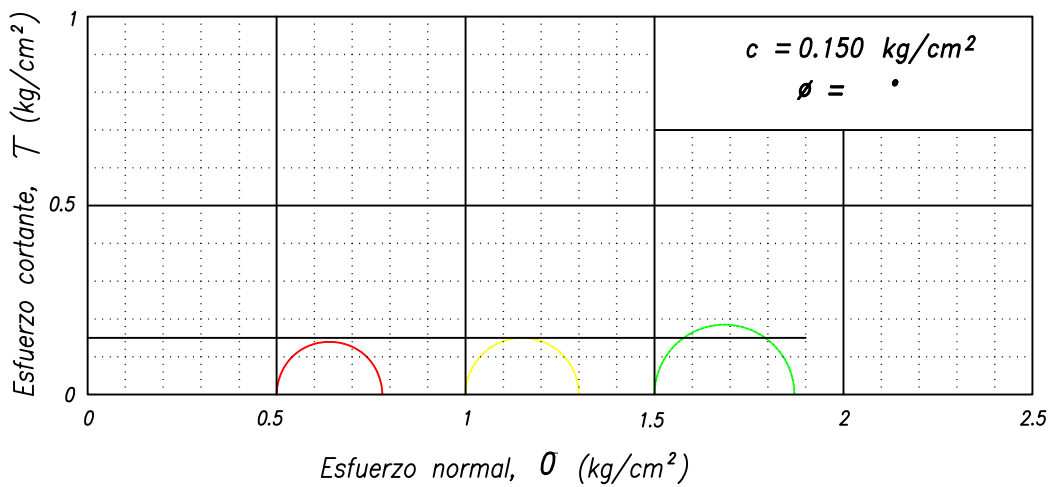
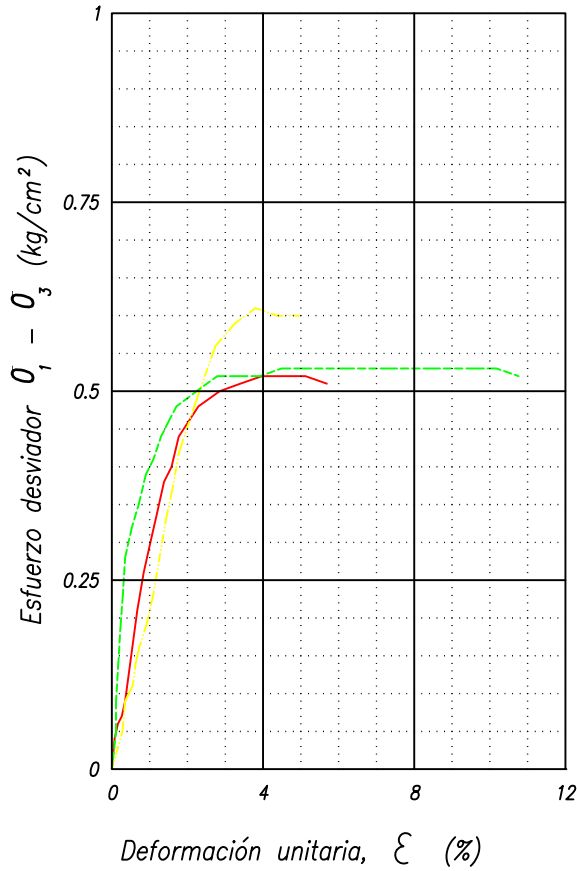


Figura 2-9

PRUEBA TRIAXIAL UU

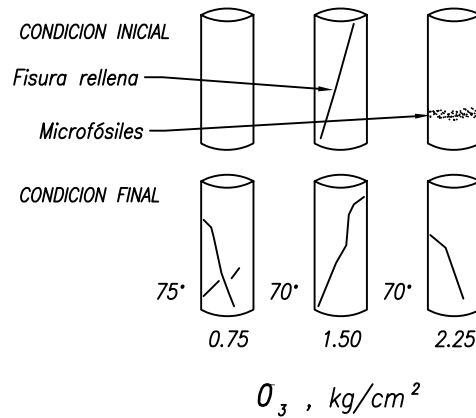
OBRA : _____



DESCRIPCION DEL MATERIAL

Arcilla café olivo, con manchas grises y rojas, con fisuras rellenas de ceniza volcánica

| SIMBOLO | σ_3 kg/cm ² | E_{50} kg/cm ² |
|---------|----------------------------------|--------------------------------|
| — | 0.75 | 29 |
| - - - | 1.50 | 21 |
| - - - | 2.25 | 37 |



| SONDEO | PROF m | T_x | σ_3 kg/cm ² | σ_d kg/cm ² | w_i % | w_f % | G_s | e_i | e_f | Sr_i % | Sr_f % | γ_n kg/m ³ |
|--------|-----------|-------|----------------------------------|----------------------------------|------------|------------|-------|-------|-------|-------------|-------------|---------------------------------|
| SMS-1 | 13.2 | UU | 0.75 | 0.52 | 170 | 170 | 2.85 | 5.0 | 5.0 | 97 | 97 | 1281 |
| | | | 1.50 | 0.61 | 173 | 173 | 2.85 | 5.1 | 5.1 | 97 | 97 | 1277 |
| | | | 2.25 | 0.53 | 158 | 158 | 2.85 | 4.8 | 4.8 | 93 | 93 | 1262 |

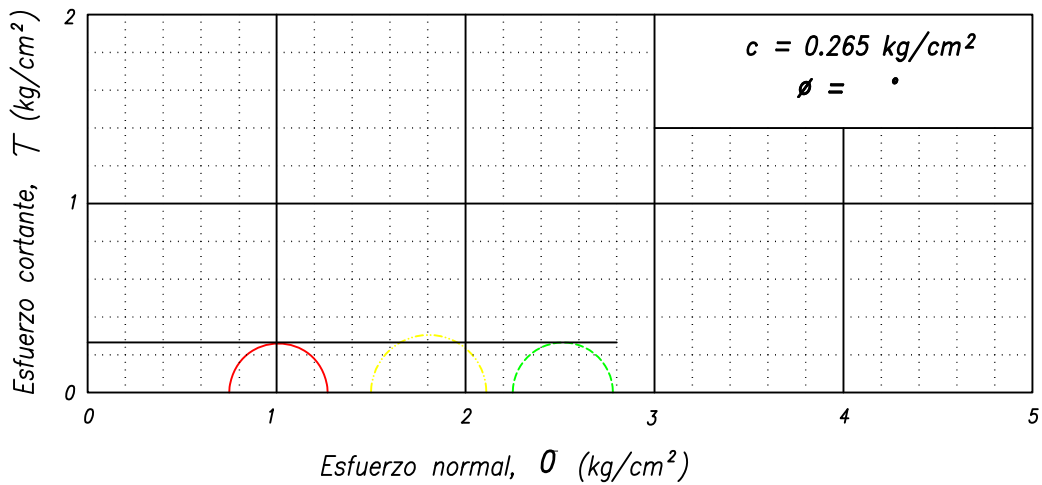
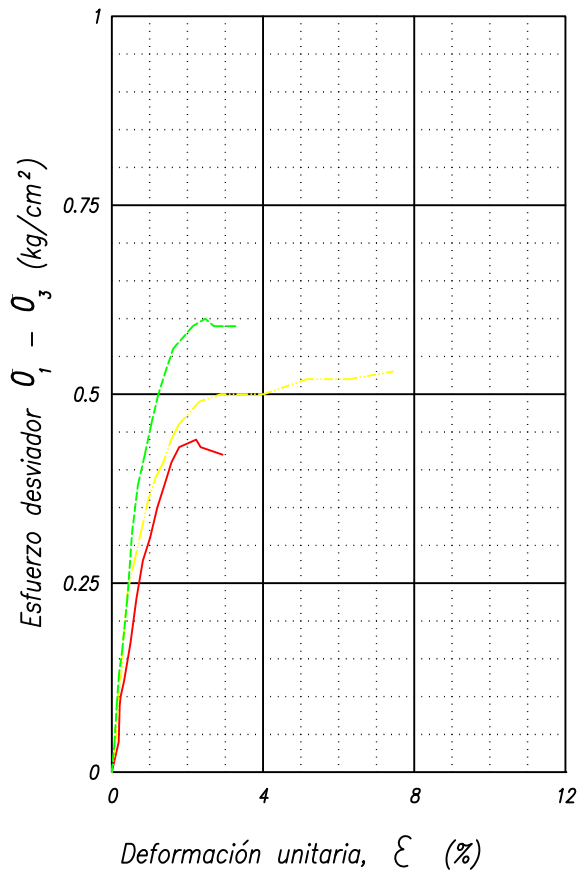


Figura 2-10

PRUEBA TRIAXIAL UU

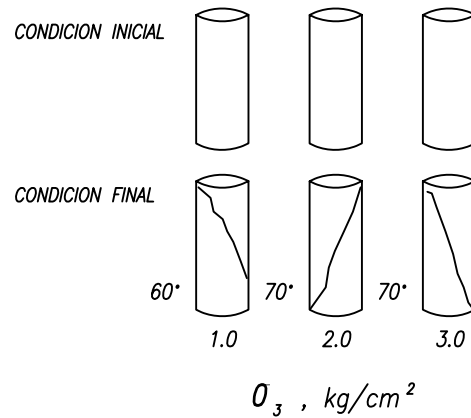
OBRA : _____



DESCRIPCION DEL MATERIAL

Arcilla café rojizo, con manchas café olivo y algunas fisuras

| SIMBOLO | σ_3 kg/cm ² | E_{50} kg/cm ² |
|-----------|----------------------------------|--------------------------------|
| — | 1.0 | 31 |
| - - - | 2.0 | 38 |
| - · - · - | 3.0 | 44 |



| SONDEO | PROF m | T_x | σ_3 kg/cm ² | σ_d kg/cm ² | w_i % | w_f % | G_s | e_i | e_f | Sr_i % | Sr_f % | γ_n kg/m ³ |
|--------|-----------|-------|----------------------------------|----------------------------------|------------|------------|-------|-------|-------|-------------|-------------|---------------------------------|
| SMS-1 | 18.0 | UU | 1.0 | 0.44 | 198 | 198 | 2.95 | 5.94 | 5.94 | 99 | 99 | 1270 |
| | | | 2.0 | 0.53 | 208 | 208 | 2.95 | 6.20 | 6.20 | 99 | 99 | 1263 |
| | | | 3.0 | 0.60 | 198 | 198 | 2.95 | 6.01 | 6.01 | 98 | 98 | 1260 |

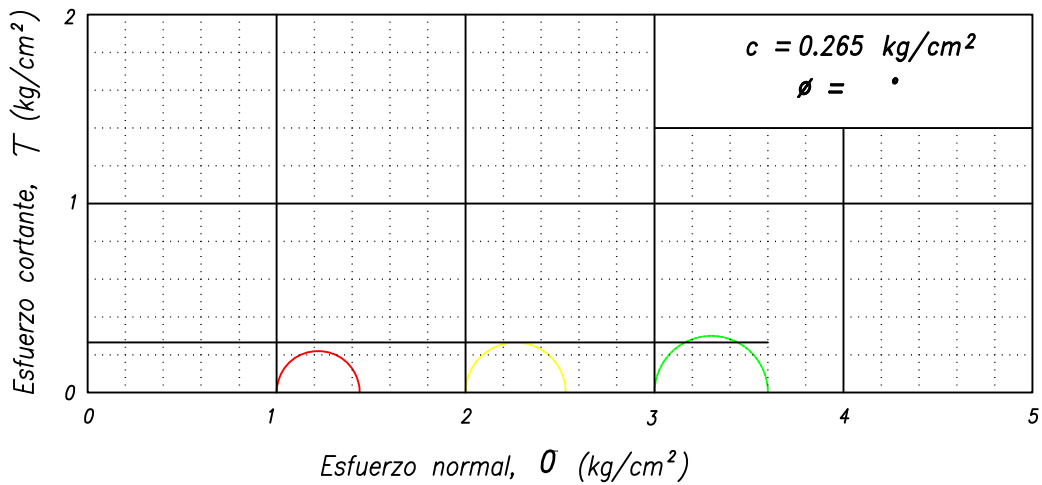
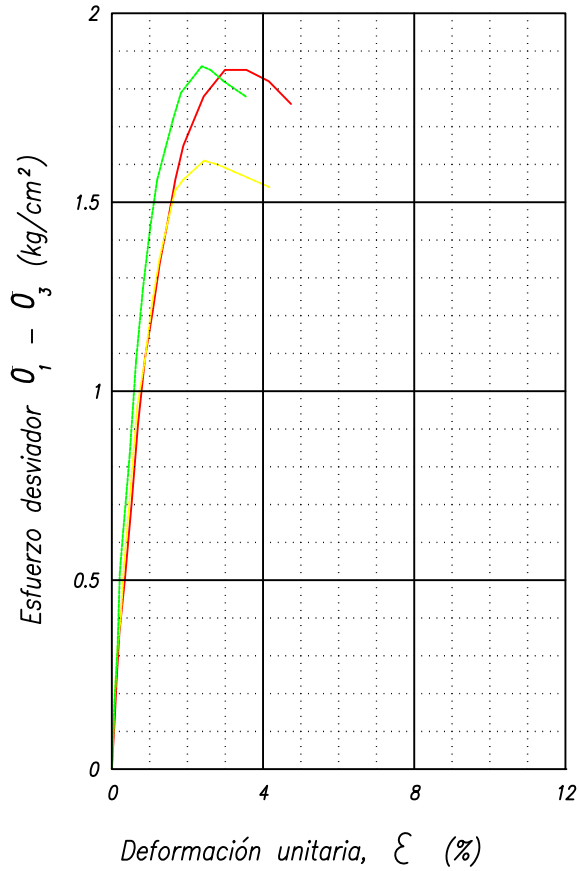


Figura 2-11

PRUEBA TRIAXIAL UU

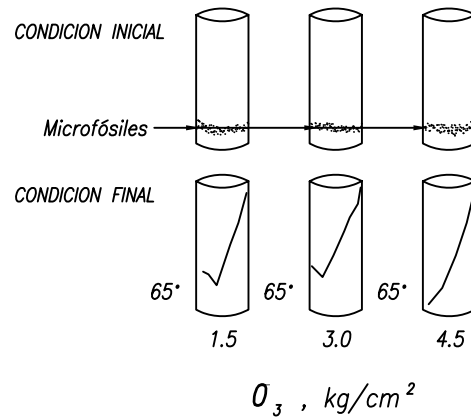
OBRA : _____



DESCRIPCION DEL MATERIAL

Arcilla café olivo, con veta de microfósiles y roja en la parte inferior

| SIMBOLO | O_3 kg/cm ² | E_{50} kg/cm ² |
|---------|-----------------------------|--------------------------------|
| — | 1.5 | 112 |
| - - - | 3.0 | 116 |
| · · · | 4.5 | 142 |



| SONDEO | PROF m | Tx | O_3 kg/cm ² | O_d kg/cm ² | w_i % | w_f % | G_s | e_i | e_f | Sr_i % | Sr_f % | γ_n kg/m ³ |
|--------|-----------|----|-----------------------------|-----------------------------|------------|------------|-------|-------|-------|-------------|-------------|---------------------------------|
| SMS-1 | 27.2 | UU | 1.5 | 1.85 | 145 | 145 | 2.94 | 4.38 | 4.38 | 98 | 98 | 1344 |
| | | | 3.0 | 1.61 | 147 | 147 | 2.94 | 4.36 | 4.36 | 99 | 99 | 1357 |
| | | | 4.5 | 1.86 | 147 | 147 | 2.94 | 4.48 | 4.48 | 96 | 96 | 1326 |

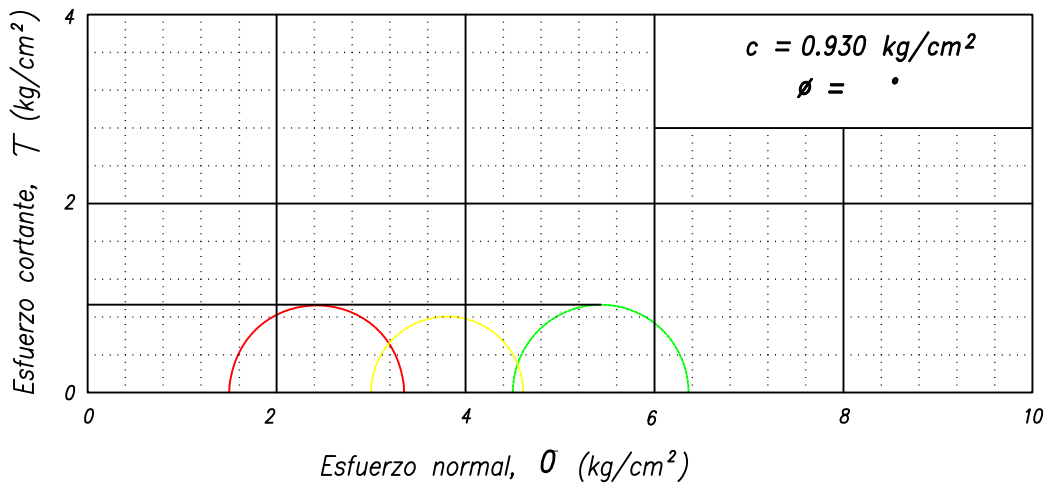
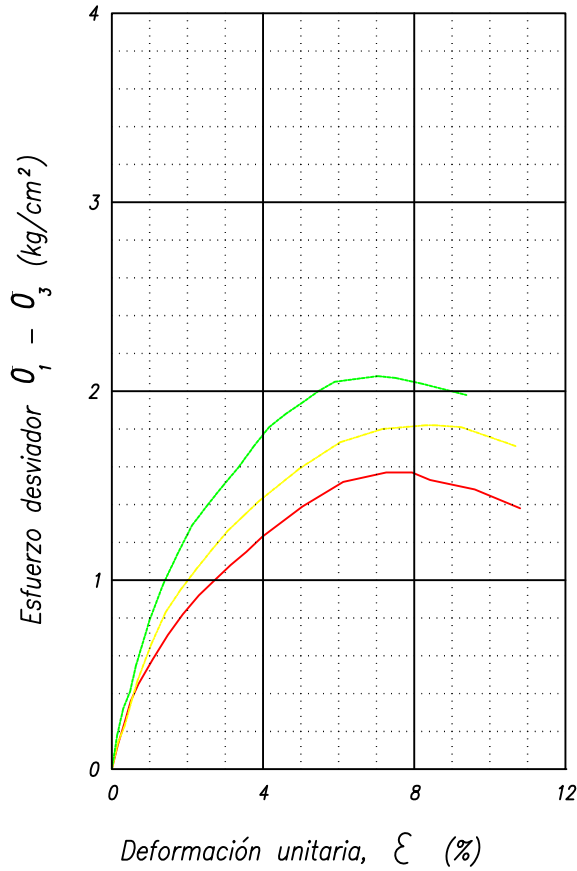


Figura 2-12

PRUEBA TRIAXIAL UU

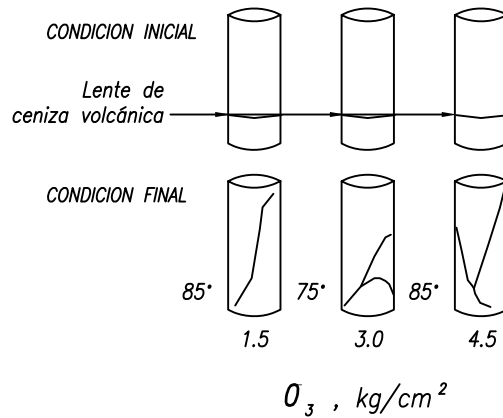
OBRA : _____



DESCRIPCION DEL MATERIAL

Arcilla café olivo, con manchas gris oscuro y lentes de ceniza volcánica

| SIMBOLO | O_3 kg/cm ² | E_{50} kg/cm ² |
|---------|-----------------------------|--------------------------------|
| — | 1.5 | 87 |
| — | 3.0 | 104 |
| — | 4.5 | 122 |



| SONDEO | PROF m | T_x | O_3 kg/cm ² | O_d kg/cm ² | w_i % | w_f % | G_s | e_i | e_f | Sr_i % | Sr_f % | γ_n kg/m ³ |
|--------|-----------|-------|-----------------------------|-----------------------------|------------|------------|-------|-------|-------|-------------|-------------|---------------------------------|
| SMS-1 | 34.5 | UU | 1.5 | 1.57 | 112 | 112 | 2.89 | 3.40 | 3.40 | 96 | 96 | 1398 |
| | | | 3.0 | 1.82 | 110 | 110 | 2.89 | 3.31 | 3.31 | 96 | 96 | 1411 |
| | | | 4.5 | 2.08 | 113 | 113 | 2.89 | 3.36 | 3.36 | 97 | 97 | 1413 |

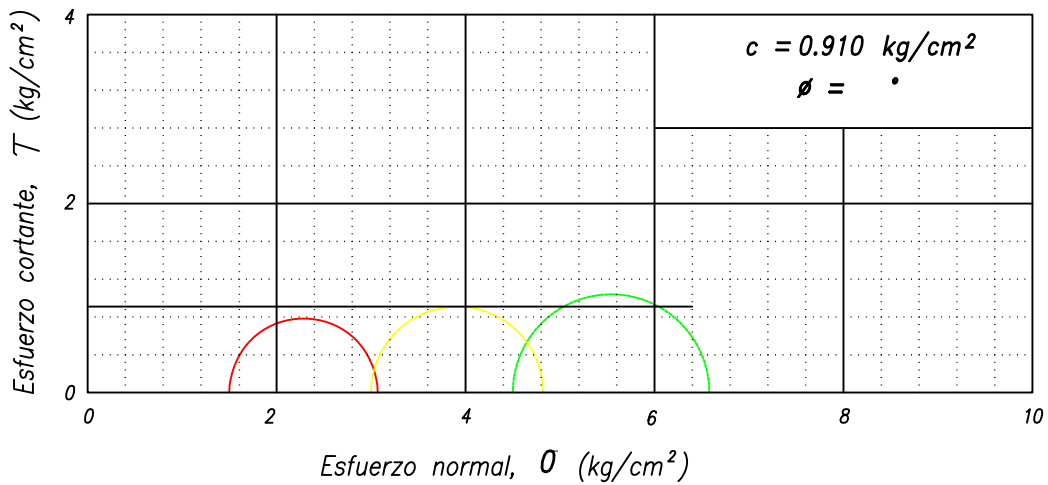


Figura 2-13

CONSOLIDACION

| | | | | |
|----------|--------------|----------------|---------|--------------------|
| PROYECTO | LOCALIZACION | OPERADOR | FECHA | Consolidómetro No. |
| SONDEO | MUESTRA | PROFUNDIDAD(m) | CALCULO | 7 |
| SMS-1 | 3-3 | 2.40-2.60 | MRD | Ss 2.531 |

Descripción del suelo:
Limo de alta plasticidad color café rojizo oscuro

| | | | | | | | | | | |
|-----------|---|----------------|-------|----|----------------|------|----|----------------|--------|-----------------|
| Anillo No | 7 | $D_{anillo} =$ | 8.010 | cm | $H_{anillo} =$ | 2.00 | cm | $A_{anillo} =$ | 50.391 | cm ³ |
|-----------|---|----------------|-------|----|----------------|------|----|----------------|--------|-----------------|

| Antes de la prueba | | Después de la prueba | |
|----------------------|-----------|-----------------------------------|-----------|
| $W_{anillo} + W_h =$ | 290.42 gr | Vidrio No. | 21 |
| $W_{anillo} =$ | 166.62 gr | $W_{vidrio} =$ | 43.06 gr |
| | | $W_{vidrio} + W_h + W_{anillo} =$ | 303.16 gr |
| | | $W_{vidrio} + W_s + W_{anillo} =$ | 243.60 gr |

| | | | | | | | | | | | |
|------------------|--------|------------------|--------------|---------|-----------------|-------------|---------|-----------------|-------------|--------|-----------------|
| $W_s =$ | 33.920 | gr | $W_{h_i} =$ | 123.800 | gr | $W_{w_i} =$ | 89.880 | gr | $W_{h_f} =$ | 93.480 | gr |
| $W_{w_f} =$ | 59.560 | gr | $V_i =$ | 100.782 | cm ³ | $V_f =$ | 64.037 | cm ³ | $V_s =$ | 13.401 | cm ³ |
| $V_{v_i} =$ | 87.382 | cm ³ | $V_{v_f} =$ | 50.636 | cm ³ | $V_{w_i} =$ | 89.880 | cm ³ | $V_{w_f} =$ | 59.560 | cm ³ |
| $\gamma_{h_i} =$ | 1.228 | t/m ³ | $\omega_i =$ | 264.976 | % | $G_{w_i} =$ | 100.000 | % | $e_i =$ | 6.5206 | |
| $\gamma_{h_f} =$ | 1.460 | t/m ³ | $\omega_f =$ | 175.590 | % | $G_{w_f} =$ | 100.000 | % | $e_f =$ | 3.7786 | |

| PRESION | Lec micrometro | δ aparato | δ lineal (ΔH) | δ vol ($\Delta H/H$) | Δe | e | V_f |
|--------------------|----------------|------------------|--------------------------------|-------------------------------|------------|--------|-----------------|
| kg/cm ² | mm | mm | mm | % | | | cm ³ |
| Lec inicial | 19.335 | | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 6.5206 | 100.782 |
| 0.040 | 19.153 | 0.010 | 0.172 | 0.860 | 0.065 | 6.4559 | 99.916 |
| 0.080 | 18.972 | 0.015 | 0.348 | 1.740 | 0.131 | 6.3898 | 99.029 |
| 0.140 | 18.730 | 0.021 | 0.584 | 2.920 | 0.220 | 6.3010 | 97.840 |
| 0.180 | 18.542 | 0.028 | 0.765 | 3.825 | 0.288 | 6.2330 | 96.928 |
| 0.230 | 18.270 | 0.039 | 1.026 | 5.130 | 0.386 | 6.1348 | 95.612 |
| 0.280 | 17.867 | 0.043 | 1.425 | 7.125 | 0.536 | 5.9848 | 93.602 |
| 0.355 | 16.891 | 0.045 | 2.399 | 11.995 | 0.902 | 5.6185 | 88.694 |
| 0.500 | 15.170 | 0.058 | 4.107 | 20.535 | 1.544 | 4.9763 | 80.087 |
| 0.750 | 13.532 | 0.073 | 5.730 | 28.650 | 2.155 | 4.3660 | 71.908 |
| 1.200 | 11.952 | 0.091 | 7.292 | 36.460 | 2.742 | 3.7786 | 64.037 |
| 0.280 | 12.362 | 0.047 | 6.926 | 34.630 | 2.604 | 3.9162 | 65.881 |
| 0.140 | 12.635 | 0.038 | 6.662 | 33.310 | 2.505 | 4.0155 | 67.212 |
| 0.000 | 13.653 | 0.000 | 5.682 | 28.410 | 2.137 | 4.3840 | 72.150 |

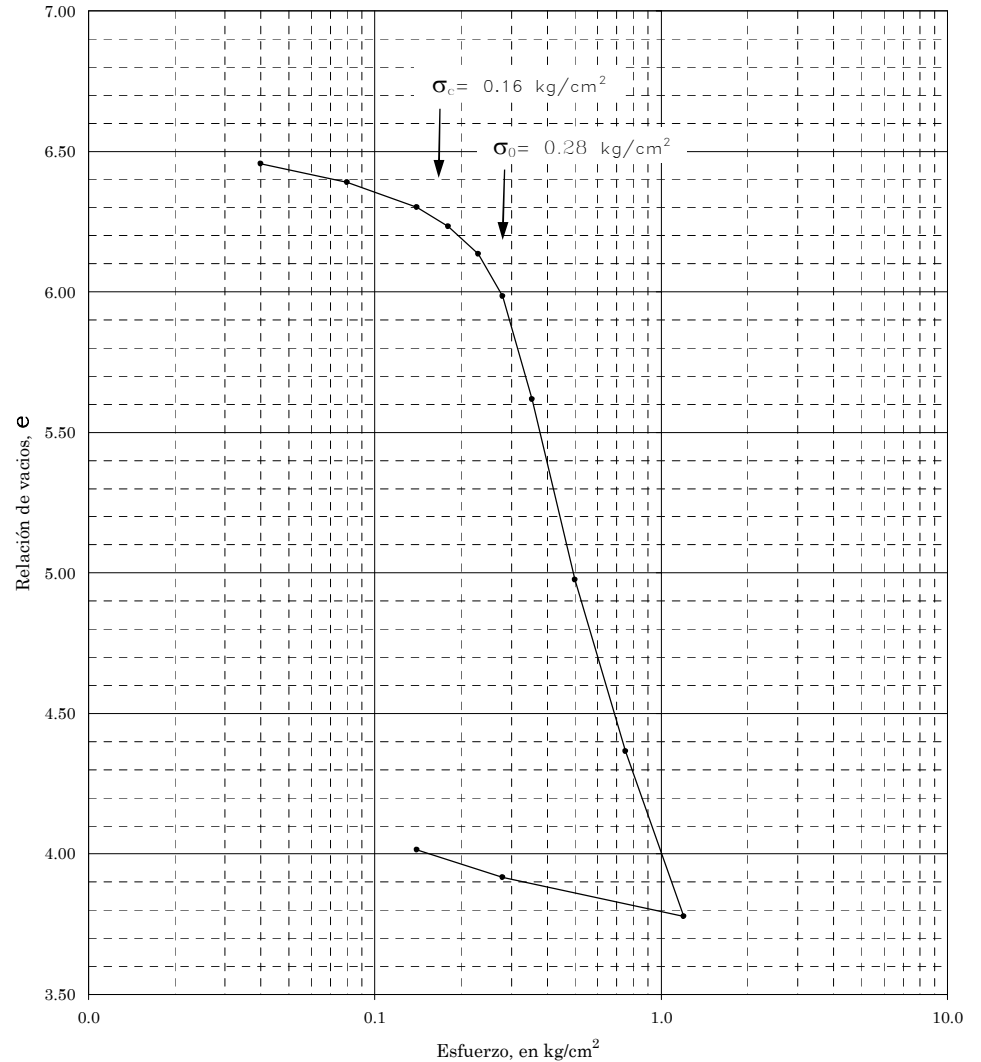


Figura 2-14

CONSOLIDACION

| | | | | |
|-----------------|----------------|-----------------------------|----------------|-------------------------|
| PROYECTO | LOCALIZACION | OPERADOR | FECHA | Consolidómetro No. 9 |
| SONDEO SMS-1 | MUESTRA 4-3 | PROFUNDIDAD(m) 3.40-3.60 | CALCULO MRD | Ss 2.649 |

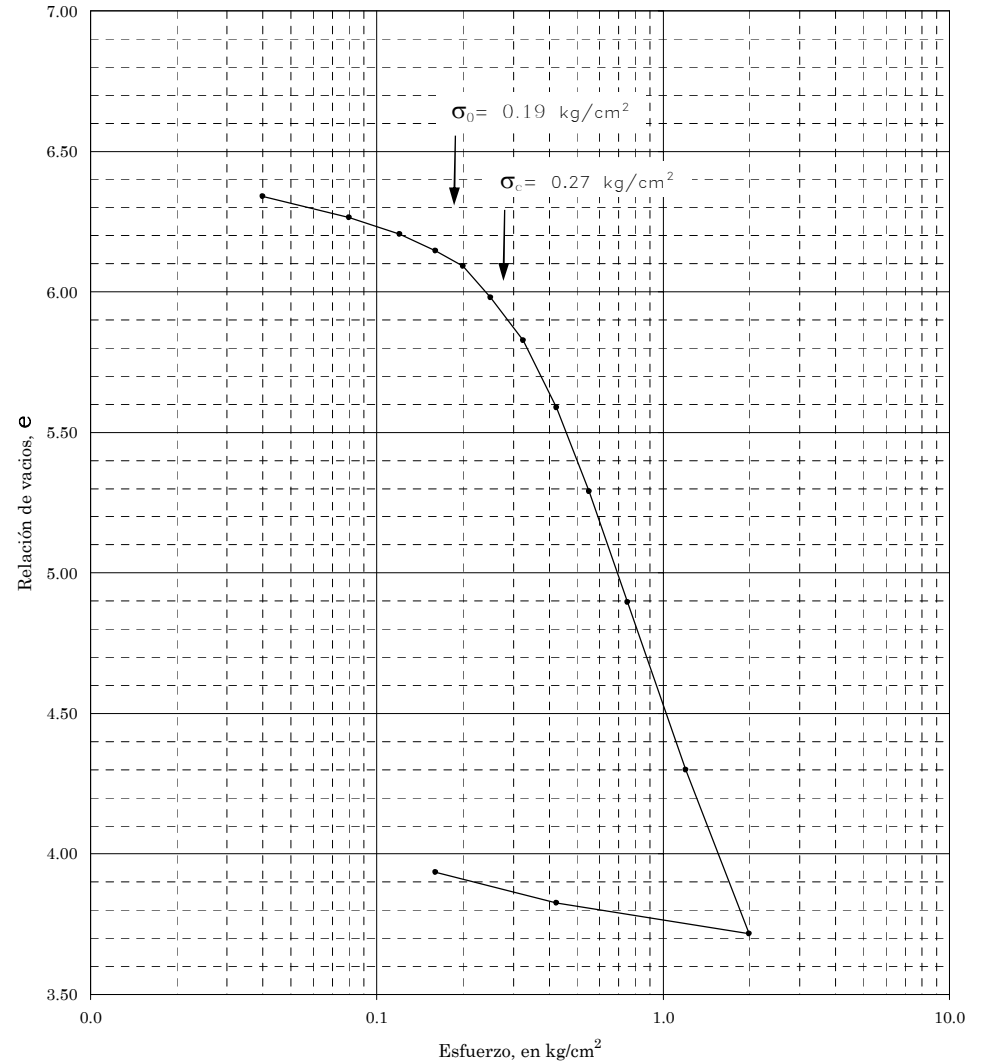
Descripción del suelo:
Limo de alta plasticidad color café rojizo, con fisura de 12 mm rellena de arcilla gris

| | | | | |
|-----------|---|-------------------------|------------------------|---------------------------------------|
| Anillo No | 9 | $D_{anillo} = 7.990$ cm | $H_{anillo} = 2.00$ cm | $A_{anillo} = 50.140$ cm ² |
|-----------|---|-------------------------|------------------------|---------------------------------------|

| Antes de la prueba | | Después de la prueba | |
|----------------------|-----------|-----------------------------------|--------------------------|
| $W_{anillo} + W_h =$ | 276.30 gr | Vidrio No. ch-18 | $W_{vidrio} =$ 116.00 gr |
| $W_{anillo} =$ | 151.87 gr | $W_{vidrio} + W_h + W_{anillo} =$ | 360.90 gr |
| | | $W_{vidrio} + W_s + W_{anillo} =$ | 303.65 gr |

| | | | |
|---|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| $W_s =$ 35.780 gr | $W_{h i} =$ 124.430 gr | $W_{w i} =$ 88.650 gr | $W_{h f} =$ 93.030 gr |
| $W_{w f} =$ 57.250 gr | $V_i =$ 100.280 cm ³ | $V_f =$ 63.703 cm ³ | $V_s =$ 13.508 cm ³ |
| $V_{v i} =$ 86.771 cm ³ | $V_{v f} =$ 50.194 cm ³ | $V_{w f} =$ 88.650 cm ³ | $V_{w i} =$ 57.250 cm ³ |
| $\gamma_{h i} =$ 1.241 t/m ³ | $\omega_i =$ 247.764 % | $G_{w i} =$ 100.000 % | $e_i =$ 6.4236 |
| $\gamma_{h f} =$ 1.460 t/m ³ | $\omega_f =$ 160.006 % | $G_{w f} =$ 100.000 % | $e_f =$ 3.7158 |

| PRESION kg/cm ² | Lec micrometro mm | δ aparato mm | δ lineal (ΔH) mm | δ vol ($\Delta H/H$) % | Δe | e | V_f cm ³ |
|-------------------------------|----------------------|------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|------------|--------|--------------------------|
| Lec inicial | 17.290 | | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 6.4236 | 100.280 |
| 0.040 | 17.061 | 0.005 | 0.224 | 1.120 | 0.083 | 6.3404 | 99.157 |
| 0.080 | 16.852 | 0.008 | 0.430 | 2.150 | 0.160 | 6.2640 | 98.124 |
| 0.120 | 16.688 | 0.011 | 0.591 | 2.955 | 0.219 | 6.2042 | 97.317 |
| 0.160 | 16.525 | 0.020 | 0.745 | 3.725 | 0.277 | 6.1470 | 96.544 |
| 0.200 | 16.370 | 0.024 | 0.896 | 4.480 | 0.333 | 6.0910 | 95.787 |
| 0.250 | 16.070 | 0.027 | 1.193 | 5.965 | 0.443 | 5.9808 | 94.298 |
| 0.325 | 15.655 | 0.031 | 1.604 | 8.020 | 0.595 | 5.8282 | 92.237 |
| 0.425 | 14.997 | 0.040 | 2.253 | 11.265 | 0.836 | 5.5873 | 88.983 |
| 0.550 | 14.193 | 0.045 | 3.052 | 15.260 | 1.133 | 5.2907 | 84.977 |
| 0.750 | 13.118 | 0.058 | 4.114 | 20.570 | 1.527 | 4.8965 | 79.652 |
| 1.200 | 11.480 | 0.085 | 5.725 | 28.625 | 2.125 | 4.2986 | 71.575 |
| 2.000 | 9.877 | 0.118 | 7.295 | 36.475 | 2.708 | 3.7158 | 63.703 |
| 0.425 | 10.245 | 0.045 | 7.000 | 35.000 | 2.598 | 3.8253 | 65.182 |
| 0.160 | 10.563 | 0.025 | 6.702 | 33.510 | 2.488 | 3.9359 | 66.676 |
| 0.000 | 11.385 | 0.000 | 5.905 | 29.525 | 2.192 | 4.2318 | 70.672 |



CONSOLIDACION

| | | | | | | | | | |
|----------|--|--------------|--|----------------|--|---------|--|--------------------|--|
| PROYECTO | | LOCALIZACION | | OPERADOR | | FECHA | | Consolidómetro No. | |
| SONDEO | | MUESTRA | | PROFUNDIDAD(m) | | CALCULO | | Ss | |
| SMS-1 | | 6-3 | | 5.40-5.60 | | MRD | | 2.676 | |

Descripción del suelo:

Limo de alta plasticidad color café rojizo oscuro

| | | | | | | | | | | |
|-----------|----|----------------|-------|----|----------------|------|----|----------------|--------|-----------------|
| Anillo No | 11 | $D_{anillo} =$ | 8.005 | cm | $H_{anillo} =$ | 1.98 | cm | $A_{anillo} =$ | 50.328 | cm ³ |
|-----------|----|----------------|-------|----|----------------|------|----|----------------|--------|-----------------|

| Antes de la prueba | | Después de la prueba | | | | |
|----------------------|--------|----------------------|-----------------------------------|----------------|--------|----|
| $W_{anillo} + W_h =$ | 285.30 | gr | Vidrio No. ch-15 | $W_{vidrio} =$ | 110.79 | gr |
| $W_{anillo} =$ | 161.28 | gr | $W_{vidrio} + W_h + W_{anillo} =$ | 365.80 | gr | |
| | | | $W_{vidrio} + W_s + W_{anillo} =$ | 306.19 | gr | |

| | | | | | | | | | | | |
|------------------|--------|------------------|--------------|---------|-----------------|-------------|---------|-----------------|-------------|--------|-----------------|
| $W_s =$ | 34.120 | gr | $W_{h_i} =$ | 124.020 | gr | $W_{w_i} =$ | 89.900 | gr | $W_{h_f} =$ | 93.730 | gr |
| $W_{w_f} =$ | 59.610 | gr | $V_i =$ | 99.650 | cm ³ | $V_f =$ | 64.093 | cm ³ | $V_s =$ | 12.751 | cm ³ |
| $V_{v_i} =$ | 86.899 | cm ³ | $V_{v_f} =$ | 51.342 | cm ³ | $V_{w_i} =$ | 89.900 | cm ³ | $V_{w_f} =$ | 59.610 | cm ³ |
| $\gamma_{h_i} =$ | 1.245 | t/m ³ | $\omega_i =$ | 263.482 | % | $G_{w_i} =$ | 100.000 | % | $e_i =$ | 6.8150 | |
| $\gamma_{h_f} =$ | 1.462 | t/m ³ | $\omega_f =$ | 174.707 | % | $G_{w_f} =$ | 100.000 | % | $e_f =$ | 4.0265 | |

| PRESION | Lec micrometro | δ aparato | δ lineal (ΔH) | δ vol ($\Delta H/H$) | Δe | e | V_f |
|--------------------|----------------|------------------|--------------------------------|-------------------------------|------------|--------|-----------------|
| kg/cm ² | mm | mm | mm | % | | | cm ³ |
| Lec inicial | 18.492 | | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 6.8150 | 99.650 |
| 0.040 | 18.229 | 0.004 | 0.259 | 1.308 | 0.102 | 6.7128 | 98.347 |
| 0.080 | 18.055 | 0.008 | 0.429 | 2.167 | 0.169 | 6.6457 | 97.491 |
| 0.120 | 17.880 | 0.011 | 0.601 | 3.035 | 0.237 | 6.5778 | 96.625 |
| 0.160 | 17.717 | 0.017 | 0.758 | 3.828 | 0.299 | 6.5158 | 95.835 |
| 0.200 | 17.530 | 0.020 | 0.942 | 4.758 | 0.372 | 6.4432 | 94.909 |
| 0.250 | 17.285 | 0.023 | 1.184 | 5.980 | 0.467 | 6.3477 | 93.691 |
| 0.300 | 16.982 | 0.025 | 1.485 | 7.500 | 0.586 | 6.2289 | 92.176 |
| 0.400 | 16.138 | 0.033 | 2.321 | 11.722 | 0.916 | 5.8989 | 87.969 |
| 0.600 | 14.615 | 0.036 | 3.841 | 19.399 | 1.516 | 5.2990 | 80.319 |
| 1.000 | 12.721 | 0.048 | 5.723 | 28.904 | 2.259 | 4.5562 | 70.847 |
| 1.500 | 11.370 | 0.057 | 7.065 | 35.682 | 2.789 | 4.0265 | 64.093 |
| 0.300 | 11.853 | 0.027 | 6.612 | 33.394 | 2.610 | 4.2053 | 66.373 |
| 0.120 | 12.210 | 0.020 | 6.262 | 31.626 | 2.472 | 4.3434 | 68.134 |
| 0.000 | 13.013 | 0.000 | 5.479 | 27.672 | 2.163 | 4.6525 | 72.075 |

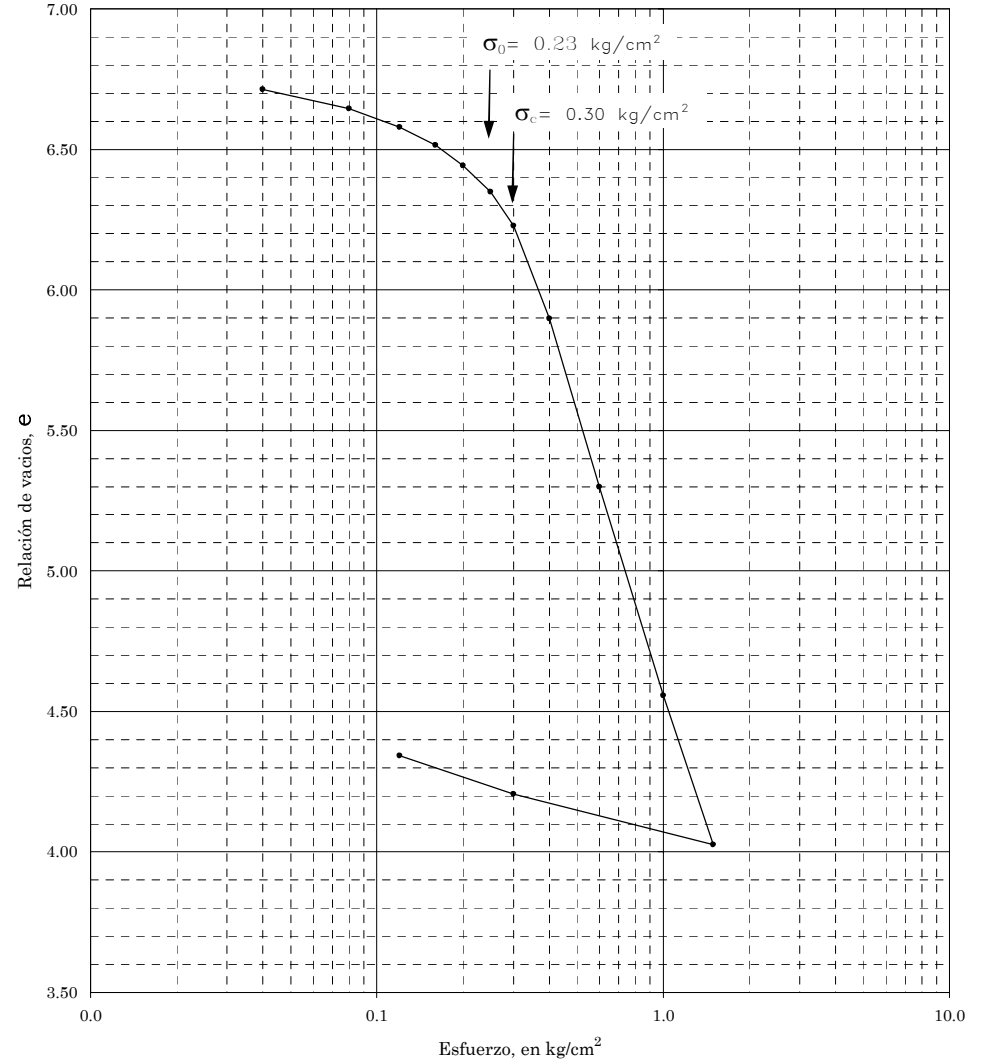


Figura 2-16

CONSOLIDACION

| | | | | |
|----------|--------------|----------------|---------|--------------------|
| PROYECTO | LOCALIZACION | OPERADOR | FECHA | Consolidómetro No. |
| SONDEO | MUESTRA | PROFUNDIDAD(m) | CALCULO | 12 |
| SMS-1 | 7-3 | 6.40-6.60 | MRD | Ss 2.417 |

Descripción del suelo:
Arcilla de alta plasticidad color gris olivo con manchas negras

| | | | | |
|-----------|----|-------------------------|------------------------|---------------------------------------|
| Anillo No | 12 | $D_{anillo} = 8.000$ cm | $H_{anillo} = 1.99$ cm | $A_{anillo} = 50.265$ cm ³ |
|-----------|----|-------------------------|------------------------|---------------------------------------|

| Antes de la prueba | | Después de la prueba | |
|----------------------|-----------|-----------------------------------|-----------|
| $W_{anillo} + W_h =$ | 285.60 gr | Vidrio No. | 14 |
| | | $W_{vidrio} =$ | 53.71 gr |
| $W_{anillo} =$ | 162.47 gr | $W_{vidrio} + W_h + W_{anillo} =$ | 304.16 gr |
| | | $W_{vidrio} + W_s + W_{anillo} =$ | 244.81 gr |

| | | | | | | | |
|------------------|------------------------|--------------|-------------------------|-------------|------------------------|-------------|------------------------|
| $W_s =$ | 28.630 gr | $W_{h_i} =$ | 123.130 gr | $W_{w_i} =$ | 94.500 gr | $W_{h_f} =$ | 87.980 gr |
| $W_{w_f} =$ | 59.350 gr | $V_i =$ | 100.028 cm ³ | $V_f =$ | 58.866 cm ³ | $V_s =$ | 11.847 cm ³ |
| $V_{v_i} =$ | 88.181 cm ³ | $V_{v_f} =$ | 47.019 cm ³ | $V_{w_i} =$ | 94.500 cm ³ | $V_{w_f} =$ | 59.350 cm ³ |
| $\gamma_{h_i} =$ | 1.231 t/m ³ | $\omega_i =$ | 330.073 % | $G_{w_i} =$ | 100.000 % | $e_i =$ | 7.4431 |
| $\gamma_{h_f} =$ | 1.495 t/m ³ | $\omega_f =$ | 207.300 % | $G_{w_f} =$ | 100.000 % | $e_f =$ | 3.9687 |

| PRESSION kg/cm ² | Lec micrometro mm | δ aparato mm | δ lineal (ΔH) mm | δ vol ($\Delta H/H$) % | Δe | e | V_f cm ³ |
|--------------------------------|----------------------|------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|------------|--------|--------------------------|
| Lec inicial | 16.390 | | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 7.4431 | 100.028 |
| 0.040 | 16.145 | 0.004 | 0.241 | 1.211 | 0.102 | 7.3409 | 98.817 |
| 0.080 | 15.970 | 0.007 | 0.413 | 2.075 | 0.175 | 7.2679 | 97.952 |
| 0.120 | 15.797 | 0.009 | 0.584 | 2.935 | 0.248 | 7.1953 | 97.093 |
| 0.160 | 15.632 | 0.015 | 0.743 | 3.734 | 0.315 | 7.1279 | 96.294 |
| 0.200 | 15.441 | 0.017 | 0.932 | 4.683 | 0.395 | 7.0477 | 95.344 |
| 0.250 | 15.142 | 0.020 | 1.228 | 6.171 | 0.521 | 6.9221 | 93.856 |
| 0.300 | 14.770 | 0.022 | 1.598 | 8.030 | 0.678 | 6.7651 | 91.996 |
| 0.400 | 13.200 | 0.028 | 3.162 | 15.889 | 1.342 | 6.1016 | 84.134 |
| 0.600 | 10.715 | 0.031 | 5.644 | 28.362 | 2.395 | 5.0485 | 71.658 |
| 1.000 | 8.158 | 0.043 | 8.189 | 41.151 | 3.474 | 3.9687 | 58.866 |
| 0.250 | 8.530 | 0.025 | 7.835 | 39.372 | 3.324 | 4.1189 | 60.645 |
| 0.080 | 8.973 | 0.012 | 7.405 | 37.211 | 3.142 | 4.3013 | 62.807 |
| 0.000 | 9.913 | 0.000 | 6.477 | 32.548 | 2.748 | 4.6951 | 67.471 |

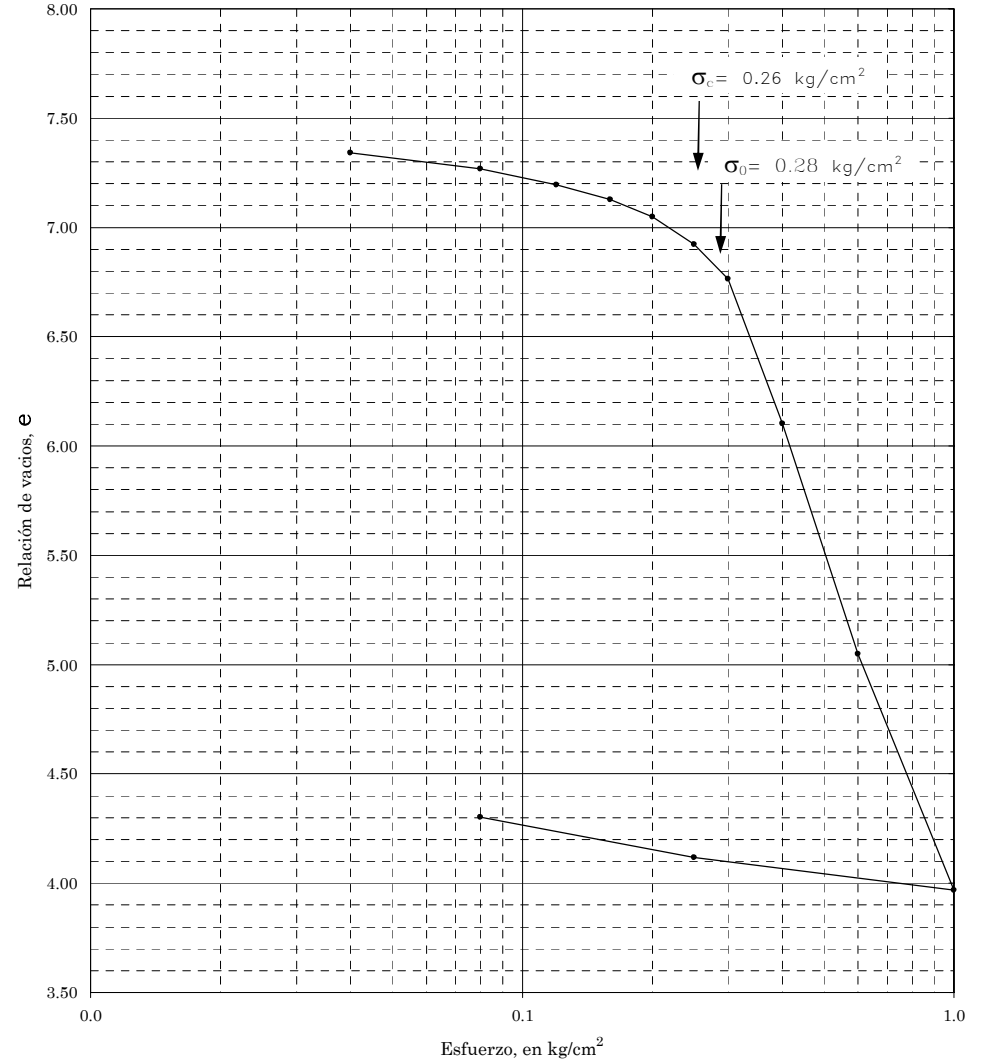


Figura 2-17

CONSOLIDACION

| | | | | |
|----------|--------------|----------------|---------|--------------------|
| PROYECTO | LOCALIZACION | OPERADOR | FECHA | Consolidómetro No. |
| SONDEO | MUESTRA | PROFUNDIDAD(m) | CALCULO | 13 |
| SMS-1 | 8-3 | 7.40-7.60 | MRD | Ss 2.600 |

Descripción del suelo:
Arcilla de alta plasticidad color café olivo

| | | | | |
|-----------|----|-------------------------|------------------------|---------------------------------------|
| Anillo No | 13 | $D_{anillo} = 7.995$ cm | $H_{anillo} = 1.97$ cm | $A_{anillo} = 50.203$ cm ³ |
|-----------|----|-------------------------|------------------------|---------------------------------------|

| Antes de la prueba | | Después de la prueba | |
|----------------------|-----------|-----------------------------------|-----------|
| $W_{anillo} + W_h =$ | 278.70 gr | Vidrio No. | 4 |
| | | $W_{vidrio} =$ | 53.65 gr |
| | | $W_{vidrio} + W_h + W_{anillo} =$ | 297.10 gr |
| $W_{anillo} =$ | 161.55 gr | $W_{vidrio} + W_s + W_{anillo} =$ | 234.42 gr |

| | | | | | | | |
|------------------|------------------------|--------------|------------------------|-------------|------------------------|-------------|------------------------|
| $W_s =$ | 19.220 gr | $W_{h_i} =$ | 117.150 gr | $W_{w_i} =$ | 97.930 gr | $W_{h_f} =$ | 81.900 gr |
| $W_{w_f} =$ | 62.680 gr | $V_i =$ | 98.899 cm ³ | $V_f =$ | 58.145 cm ³ | $V_s =$ | 7.392 cm ³ |
| $V_{v_i} =$ | 91.507 cm ³ | $V_{v_f} =$ | 50.752 cm ³ | $V_{w_i} =$ | 97.930 cm ³ | $V_{w_f} =$ | 62.680 cm ³ |
| $\gamma_{h_i} =$ | 1.185 t/m ³ | $\omega_i =$ | 509.521 % | $G_{w_i} =$ | 100.000 % | $e_i =$ | 12.3787 |
| $\gamma_{h_f} =$ | 1.409 t/m ³ | $\omega_f =$ | 326.119 % | $G_{w_f} =$ | 100.000 % | $e_f =$ | 6.8656 |

| PRESION kg/cm ² | Lec micrometro mm | δ aparato mm | δ lineal (ΔH) mm | δ vol ($\Delta H/H$) % | Δe | e | V_f cm ³ |
|-------------------------------|----------------------|------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|------------|---------|--------------------------|
| Lec inicial | 20.152 | | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 12.3787 | 98.899 |
| 0.040 | 19.973 | 0.003 | 0.176 | 0.893 | 0.120 | 12.2591 | 98.016 |
| 0.080 | 19.770 | 0.007 | 0.375 | 1.904 | 0.255 | 12.1240 | 97.017 |
| 0.120 | 19.539 | 0.009 | 0.604 | 3.066 | 0.410 | 11.9685 | 95.867 |
| 0.160 | 19.318 | 0.012 | 0.822 | 4.173 | 0.558 | 11.8204 | 94.773 |
| 0.200 | 19.065 | 0.017 | 1.070 | 5.431 | 0.727 | 11.6520 | 93.528 |
| 0.250 | 18.580 | 0.018 | 1.554 | 7.888 | 1.055 | 11.3233 | 91.098 |
| 0.300 | 17.845 | 0.019 | 2.288 | 11.614 | 1.554 | 10.8248 | 87.413 |
| 0.400 | 16.121 | 0.025 | 4.006 | 20.335 | 2.721 | 9.6581 | 78.788 |
| 0.600 | 14.253 | 0.028 | 5.871 | 29.802 | 3.987 | 8.3916 | 69.425 |
| 1.000 | 11.997 | 0.037 | 8.118 | 41.208 | 5.513 | 6.8656 | 58.145 |
| 0.250 | 12.433 | 0.018 | 7.701 | 39.091 | 5.230 | 7.1488 | 60.238 |
| 0.080 | 12.988 | 0.012 | 7.152 | 36.305 | 4.857 | 7.5216 | 62.994 |
| 0.000 | 14.008 | 0.000 | 6.144 | 31.188 | 4.173 | 8.2062 | 68.055 |

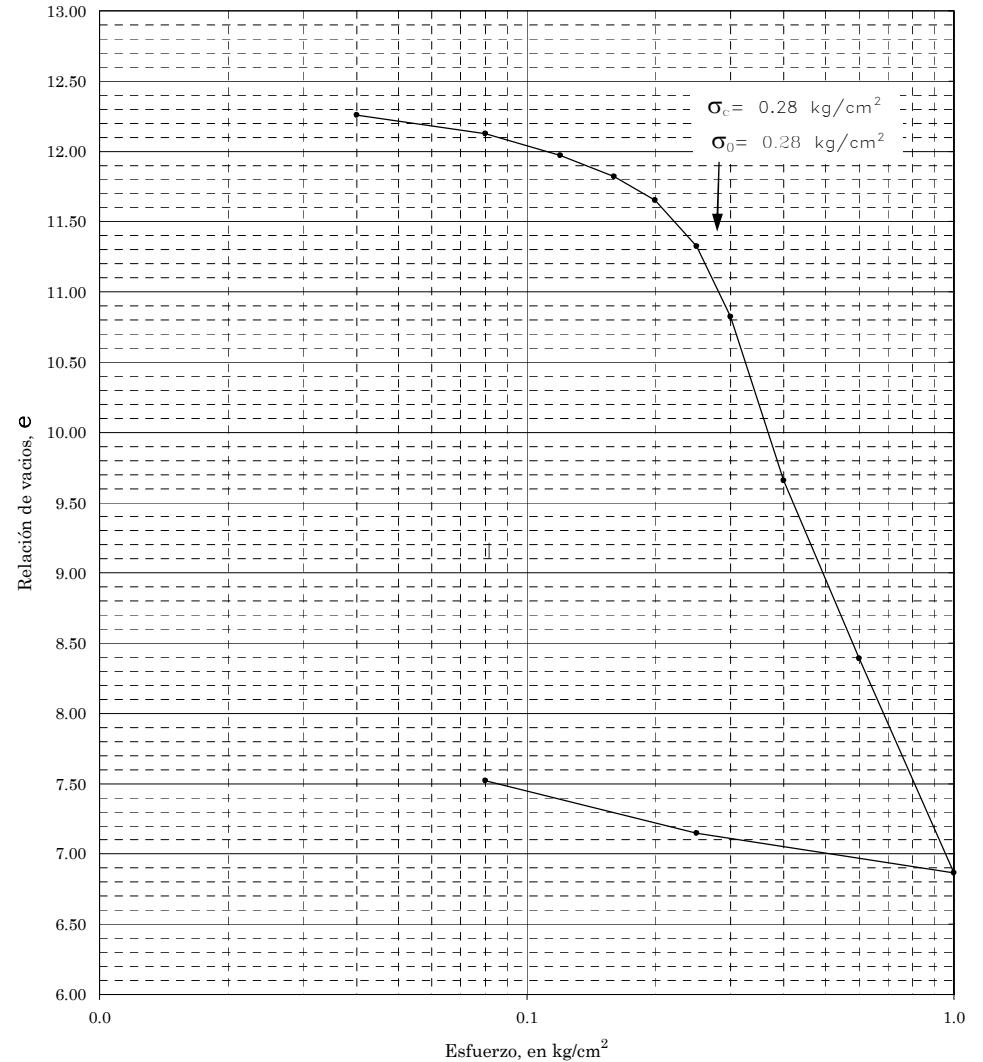


Figura 2-18

CONSOLIDACION

| | | | | |
|-----------------|----------------|-----------------------------|----------------|-------------------------|
| PROYECTO | LOCALIZACION | OPERADOR | FECHA | Consolidómetro No. 2 |
| SONDEO SMS-1 | MUESTRA 9-4 | PROFUNDIDAD(m) 8.60-8.80 | CALCULO MRD | Ss 2.600 |

Descripción del suelo:
Arcilla de alta plasticidad color café olivo con fisuras rellenas

| | | | | | | | | | | |
|-----------|---|----------------|-------|----|----------------|------|----|----------------|--------|-----------------|
| Anillo No | 2 | $D_{anillo} =$ | 8.015 | cm | $H_{anillo} =$ | 1.97 | cm | $A_{anillo} =$ | 50.454 | cm ³ |
|-----------|---|----------------|-------|----|----------------|------|----|----------------|--------|-----------------|

| Antes de la prueba | | Después de la prueba | |
|----------------------|-----------|-----------------------------------|-----------|
| $W_{anillo} + W_h =$ | 284.88 gr | Vidrio No. | 12 |
| $W_{anillo} =$ | 163.95 gr | $W_{vidrio} =$ | 56.71 gr |
| | | $W_{vidrio} + W_h + W_{anillo} =$ | 305.37 gr |
| | | $W_{vidrio} + W_s + W_{anillo} =$ | 245.61 gr |

| | | | | | | | | | | | |
|------------------|--------|------------------|--------------|---------|-----------------|-------------|---------|-----------------|-------------|--------|-----------------|
| $W_s =$ | 24.950 | gr | $W_{h_i} =$ | 120.930 | gr | $W_{w_i} =$ | 95.980 | gr | $W_{h_f} =$ | 84.710 | gr |
| $W_{w_f} =$ | 59.760 | gr | $V_i =$ | 99.395 | cm ³ | $V_f =$ | 59.924 | cm ³ | $V_s =$ | 9.596 | cm ³ |
| $V_{v_i} =$ | 89.799 | cm ³ | $V_{v_f} =$ | 50.328 | cm ³ | $V_{w_i} =$ | 95.980 | cm ³ | $V_{w_f} =$ | 59.760 | cm ³ |
| $\gamma_{h_i} =$ | 1.217 | t/m ³ | $\omega_i =$ | 384.689 | % | $G_{w_i} =$ | 100.000 | % | $e_i =$ | 9.3578 | |
| $\gamma_{h_f} =$ | 1.414 | t/m ³ | $\omega_f =$ | 239.519 | % | $G_{w_f} =$ | 100.000 | % | $e_f =$ | 5.2446 | |

| PRESION kg/cm ² | Lec micrometro mm | δ aparato mm | δ lineal (ΔH) mm | δ_{vol} ($\Delta H/H$) % | Δe | e | V_f cm ³ |
|-------------------------------|----------------------|------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|------------|--------|--------------------------|
| Lec inicial | 19.628 | | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 9.3578 | 99.395 |
| 0.040 | 19.441 | 0.003 | 0.184 | 0.934 | 0.097 | 9.2610 | 98.466 |
| 0.080 | 19.315 | 0.008 | 0.305 | 1.548 | 0.160 | 9.1974 | 97.856 |
| 0.120 | 19.165 | 0.011 | 0.452 | 2.294 | 0.238 | 9.1201 | 97.114 |
| 0.160 | 18.985 | 0.013 | 0.630 | 3.198 | 0.331 | 9.0265 | 96.216 |
| 0.200 | 18.810 | 0.018 | 0.800 | 4.061 | 0.421 | 8.9371 | 95.358 |
| 0.240 | 18.545 | 0.019 | 1.064 | 5.401 | 0.559 | 8.7983 | 94.026 |
| 0.300 | 17.932 | 0.021 | 1.675 | 8.503 | 0.881 | 8.4771 | 90.944 |
| 0.400 | 16.425 | 0.028 | 3.175 | 16.117 | 1.669 | 7.6884 | 83.375 |
| 0.600 | 14.125 | 0.032 | 5.471 | 27.772 | 2.877 | 6.4812 | 71.791 |
| 1.000 | 11.758 | 0.047 | 7.823 | 39.711 | 4.113 | 5.2446 | 59.924 |
| 0.240 | 12.260 | 0.018 | 7.350 | 37.310 | 3.864 | 5.4933 | 62.311 |
| 0.080 | 12.648 | 0.015 | 6.965 | 35.355 | 3.662 | 5.6957 | 64.253 |
| 0.000 | 13.430 | 0.000 | 6.198 | 31.462 | 3.259 | 6.0990 | 68.123 |

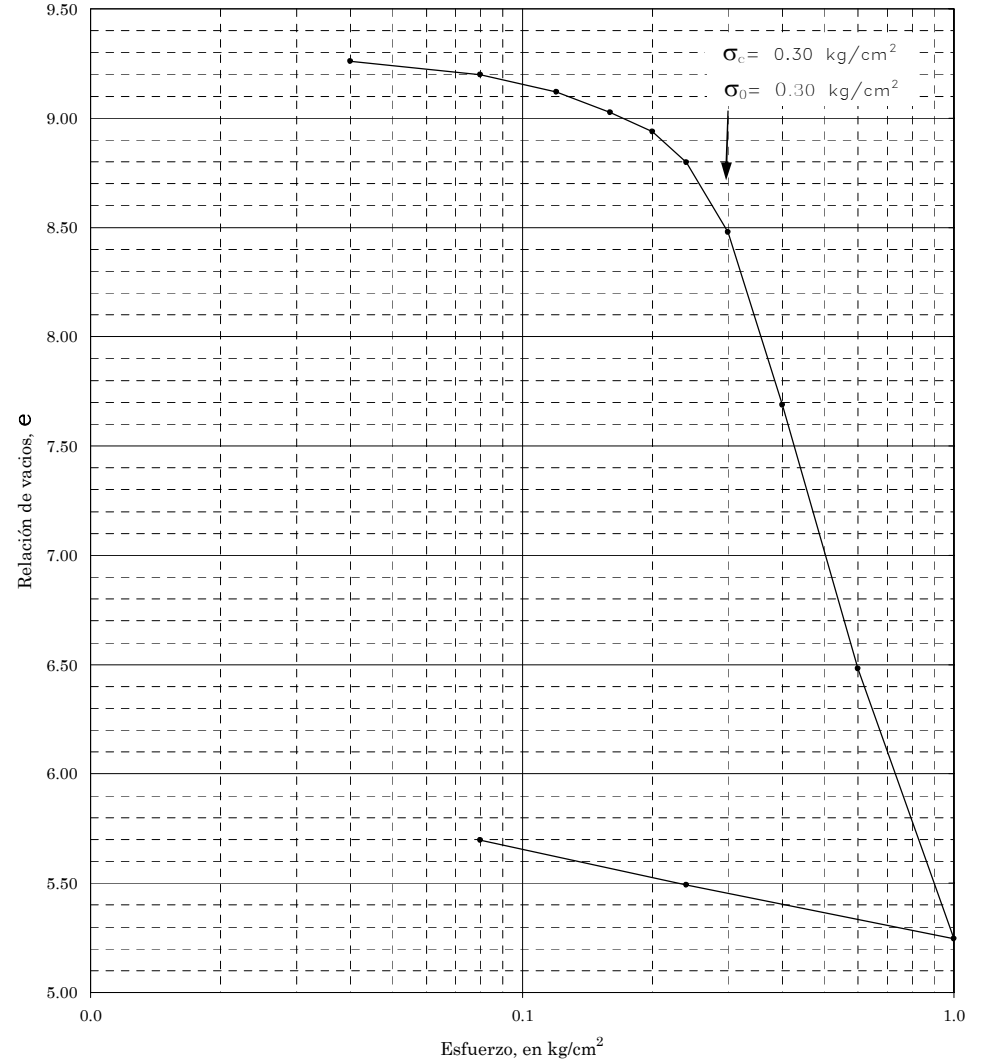


Figura 2-19

CONSOLIDACION

| | | | | |
|----------|--------------|----------------|---------|--------------------|
| PROYECTO | LOCALIZACION | OPERADOR | FECHA | Consolidómetro No. |
| SONDEO | MUESTRA | PROFUNDIDAD(m) | CALCULO | 5 |
| SMS-1 | 10-2 | 9.20-9.40 | MRD | Ss 2.600 |

Descripción del suelo:
Arcilla de alta plasticidad color gris olivo con manchas café oscuro y fisura

| | | | | | | | | | | |
|-----------|---|----------------|-------|----|----------------|------|----|----------------|--------|-----------------|
| Anillo No | 5 | $D_{anillo} =$ | 8.000 | cm | $H_{anillo} =$ | 2.00 | cm | $A_{anillo} =$ | 50.265 | cm ³ |
|-----------|---|----------------|-------|----|----------------|------|----|----------------|--------|-----------------|

| Antes de la prueba | | Después de la prueba | |
|----------------------|-----------|-----------------------------------|-----------|
| $W_{anillo} + W_h =$ | 288.60 gr | Vidrio No. | ch-14 |
| $W_{anillo} =$ | 165.15 gr | $W_{vidrio} =$ | 116.99 gr |
| | | $W_{vidrio} + W_h + W_{anillo} =$ | 374.50 gr |
| | | $W_{vidrio} + W_s + W_{anillo} =$ | 311.22 gr |

| | | | | | | | | | | | |
|------------------|--------|------------------|--------------|---------|-----------------|-------------|---------|-----------------|-------------|--------|-----------------|
| $W_s =$ | 29.080 | gr | $W_{h_i} =$ | 123.450 | gr | $W_{w_i} =$ | 94.370 | gr | $W_{h_f} =$ | 92.360 | gr |
| $W_{w_f} =$ | 63.280 | gr | $V_i =$ | 100.531 | cm ³ | $V_f =$ | 63.440 | cm ³ | $V_s =$ | 11.185 | cm ³ |
| $V_{v_i} =$ | 89.346 | cm ³ | $V_{v_f} =$ | 52.255 | cm ³ | $V_{w_i} =$ | 94.370 | cm ³ | $V_{w_f} =$ | 63.280 | cm ³ |
| $\gamma_{h_i} =$ | 1.228 | t/m ³ | $\omega_i =$ | 324.519 | % | $G_{w_i} =$ | 100.000 | % | $e_i =$ | 7.9883 | |
| $\gamma_{h_f} =$ | 1.456 | t/m ³ | $\omega_f =$ | 217.607 | % | $G_{w_f} =$ | 100.000 | % | $e_f =$ | 4.6721 | |

| PRESION kg/cm ² | Lec micrometro mm | δ aparato mm | δ lineal (ΔH) mm | δ vol ($\Delta H/H$) % | Δe | e | V_f cm ³ |
|-------------------------------|----------------------|------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|------------|--------|--------------------------|
| Lec inicial | 23.528 | | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 7.9883 | 100.531 |
| 0.040 | 23.255 | 0.005 | 0.268 | 1.340 | 0.120 | 7.8679 | 99.184 |
| 0.080 | 23.031 | 0.010 | 0.487 | 2.435 | 0.219 | 7.7695 | 98.083 |
| 0.120 | 22.783 | 0.015 | 0.730 | 3.650 | 0.328 | 7.6603 | 96.862 |
| 0.160 | 22.512 | 0.020 | 0.996 | 4.980 | 0.448 | 7.5407 | 95.525 |
| 0.220 | 22.020 | 0.027 | 1.481 | 7.405 | 0.666 | 7.3227 | 93.087 |
| 0.300 | 21.012 | 0.031 | 2.485 | 12.425 | 1.117 | 6.8715 | 88.040 |
| 0.450 | 19.278 | 0.043 | 4.207 | 21.035 | 1.891 | 6.0976 | 79.384 |
| 0.700 | 17.450 | 0.055 | 6.023 | 30.115 | 2.707 | 5.2815 | 70.256 |
| 1.000 | 16.082 | 0.067 | 7.379 | 36.895 | 3.316 | 4.6721 | 63.440 |
| 0.300 | 16.398 | 0.034 | 7.096 | 35.480 | 3.189 | 4.7993 | 64.863 |
| 0.120 | 16.753 | 0.020 | 6.755 | 33.775 | 3.036 | 4.9525 | 66.577 |
| 0.000 | 17.037 | 0.000 | 6.491 | 32.455 | 2.917 | 5.0712 | 67.904 |

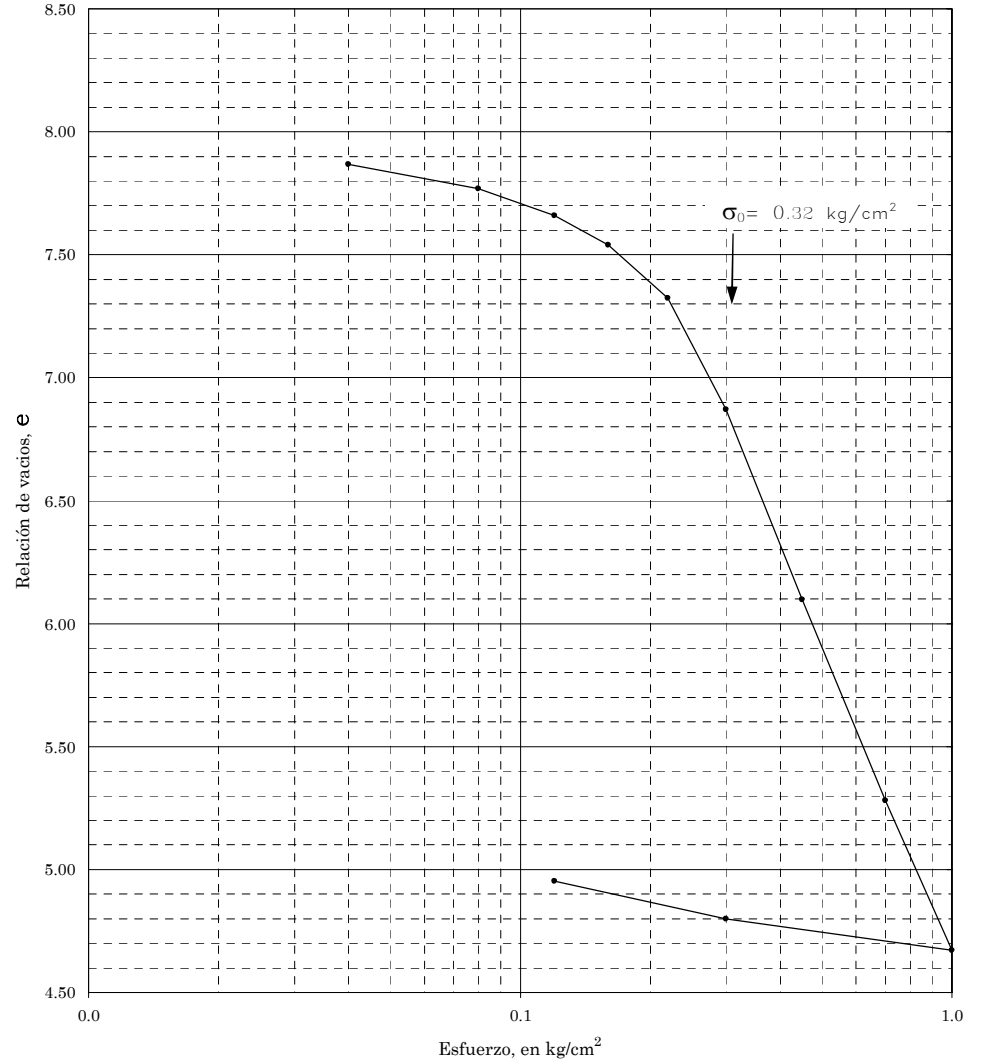


Figura 2-20

CONSOLIDACION

| | | | | |
|-----------------|-----------------|-------------------------------|----------------|-------------------------|
| PROYECTO | LOCALIZACION | OPERADOR | FECHA | Consolidómetro No. 8 |
| SONDEO SMS-1 | MUESTRA 11-4 | PROFUNDIDAD(m) 13.10-13.30 | CALCULO MRD | Ss 2.853 |

Descripción del suelo:
Arcilla de alta plasticidad color gris y café olivo

| | | | | |
|-----------|---|-------------------------|------------------------|---------------------------------------|
| Anillo No | 8 | $D_{anillo} = 7.985$ cm | $H_{anillo} = 2.00$ cm | $A_{anillo} = 50.077$ cm ³ |
|-----------|---|-------------------------|------------------------|---------------------------------------|

| Antes de la prueba | | Después de la prueba | |
|--------------------------------|---|-------------------------|--|
| $W_{anillo} + W_h = 280.70$ gr | Vidrio No. 10 | $W_{vidrio} = 41.05$ gr | |
| $W_{anillo} = 153.70$ gr | $W_{vidrio} + W_h + W_{anillo} = 281.20$ gr | | |
| | $W_{vidrio} + W_s + W_{anillo} = 228.81$ gr | | |

| | | | |
|---|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| $W_s = 34.060$ gr | $W_{h i} = 127.000$ gr | $W_{w i} = 92.940$ gr | $W_{h f} = 86.450$ gr |
| $W_{w f} = 52.390$ gr | $V_i = 100.154$ cm ³ | $V_f = 55.516$ cm ³ | $V_s = 11.938$ cm ³ |
| $V_{v i} = 88.216$ cm ³ | $V_{v f} = 43.577$ cm ³ | $V_{w f} = 92.940$ cm ³ | $V_{w f} = 52.390$ cm ³ |
| $\gamma_{h i} = 1.268$ t/m ³ | $\omega_i = 272.871$ % | $G_{w i} = 100.000$ % | $e_i = 7.3892$ |
| $\gamma_{h f} = 1.557$ t/m ³ | $\omega_f = 153.817$ % | $G_{w f} = 100.000$ % | $e_f = 3.6501$ |

| PRESION kg/cm ² | Lec micrometro mm | δ aparato mm | δ lineal (ΔH) mm | δ vol ($\Delta H/H$) % | Δe | e | V_f cm ³ |
|-------------------------------|----------------------|------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|------------|--------|--------------------------|
| Lec inicial | 17.730 | | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 7.3892 | 100.154 |
| 0.040 | 17.563 | 0.012 | 0.155 | 0.775 | 0.065 | 7.3242 | 99.378 |
| 0.080 | 17.465 | 0.014 | 0.251 | 1.255 | 0.105 | 7.2839 | 98.897 |
| 0.120 | 17.365 | 0.018 | 0.347 | 1.735 | 0.146 | 7.2437 | 98.417 |
| 0.160 | 17.252 | 0.022 | 0.456 | 2.280 | 0.191 | 7.1979 | 97.871 |
| 0.210 | 17.123 | 0.028 | 0.579 | 2.895 | 0.243 | 7.1463 | 97.255 |
| 0.260 | 16.988 | 0.031 | 0.711 | 3.555 | 0.298 | 7.0910 | 96.594 |
| 0.310 | 16.847 | 0.032 | 0.851 | 4.255 | 0.357 | 7.0323 | 95.893 |
| 0.400 | 16.557 | 0.040 | 1.133 | 5.665 | 0.475 | 6.9140 | 94.481 |
| 0.600 | 15.563 | 0.046 | 2.121 | 10.605 | 0.890 | 6.4995 | 89.533 |
| 1.000 | 12.445 | 0.063 | 5.222 | 26.110 | 2.190 | 5.1988 | 74.004 |
| 2.000 | 8.730 | 0.086 | 8.914 | 44.570 | 3.739 | 3.6501 | 55.516 |
| 0.310 | 9.325 | 0.042 | 8.363 | 41.815 | 3.508 | 3.8813 | 58.275 |
| 0.120 | 9.725 | 0.027 | 7.978 | 39.890 | 3.346 | 4.0428 | 60.203 |
| 0.000 | 10.530 | 0.000 | 7.200 | 36.000 | 3.020 | 4.3691 | 64.099 |

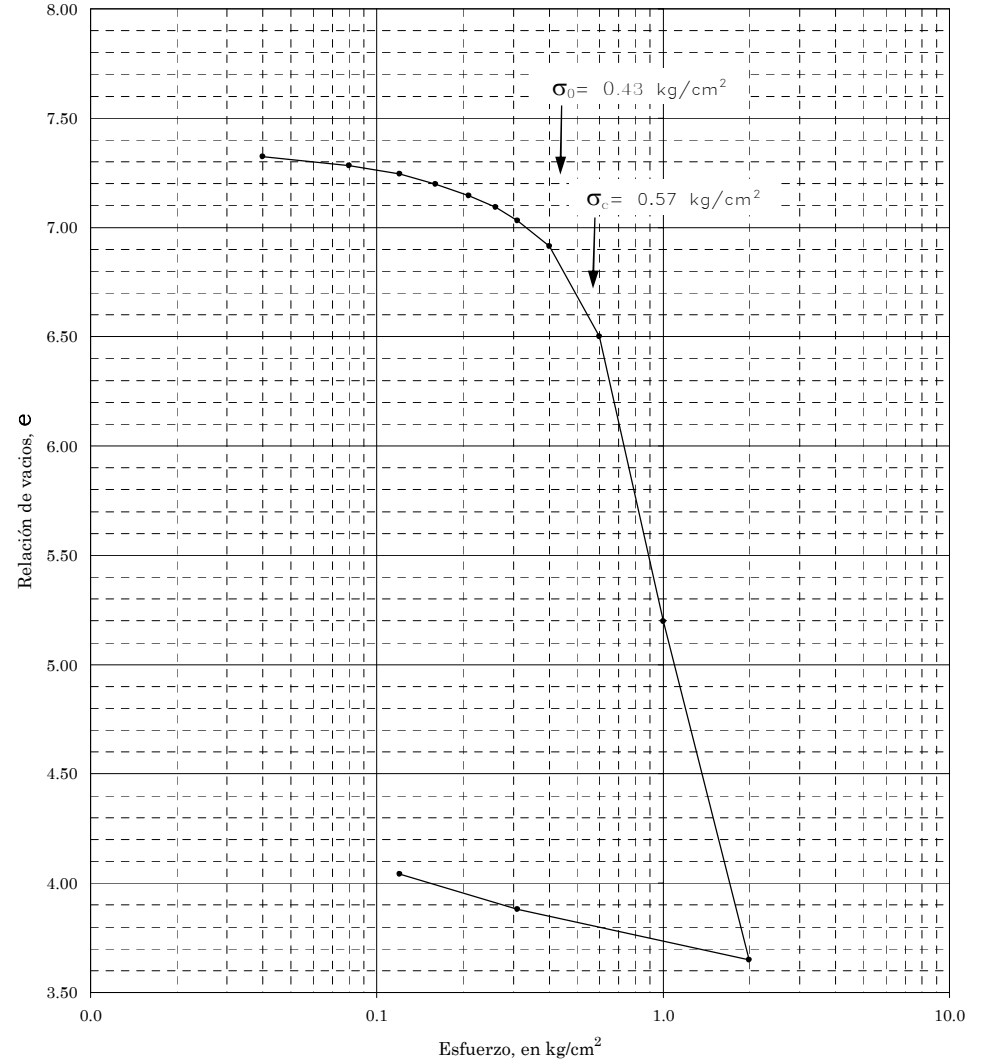


Figura 2-21

CONSOLIDACION

| | | | | |
|-----------------|-----------------|-------------------------|----------------|-------------------------|
| PROYECTO | LOCALIZACION | OPERADOR | FECHA | Consolidómetro No. 1 |
| SONDEO SMS-1 | MUESTRA 12-3 | PROFUNDIDAD(m) 18.00 | CALCULO MRD | Ss 2.958 |

Descripción del suelo:
Arcilla de alta plasticidad color café olivo

| | | | | |
|-----------|---|-------------------------|------------------------|---------------------------------------|
| Anillo No | 1 | $D_{anillo} = 8.000$ cm | $H_{anillo} = 1.99$ cm | $A_{anillo} = 50.265$ cm ³ |
|-----------|---|-------------------------|------------------------|---------------------------------------|

| Antes de la prueba | | Después de la prueba | |
|----------------------|-----------|-----------------------------------|-----------|
| $W_{anillo} + W_h =$ | 296.74 gr | Vidrio No. | 17 |
| $W_{anillo} =$ | 167.20 gr | $W_{vidrio} =$ | 41.67 gr |
| | | $W_{vidrio} + W_h + W_{anillo} =$ | 303.72 gr |
| | | $W_{vidrio} + W_s + W_{anillo} =$ | 244.62 gr |

| | | | | | | | |
|-----------------|------------------------|--------------|-------------------------|------------|------------------------|------------|------------------------|
| $W_s =$ | 35.750 gr | $W_{hi} =$ | 129.540 gr | $W_{wi} =$ | 93.790 gr | $W_{hf} =$ | 94.850 gr |
| $W_{wf} =$ | 59.100 gr | $V_i =$ | 100.028 cm ³ | $V_f =$ | 63.335 cm ³ | $V_s =$ | 12.085 cm ³ |
| $V_{vi} =$ | 87.943 cm ³ | $V_{vf} =$ | 51.250 cm ³ | $V_{wi} =$ | 93.790 cm ³ | $V_{wf} =$ | 59.100 cm ³ |
| $\gamma_{hi} =$ | 1.295 t/m ³ | $\omega_i =$ | 262.350 % | $G_{wi} =$ | 100.000 % | $e_i =$ | 7.2771 |
| $\gamma_{hf} =$ | 1.498 t/m ³ | $\omega_f =$ | 165.315 % | $G_{wf} =$ | 100.000 % | $e_f =$ | 4.2408 |

| PRESION kg/cm ² | Lec micrometro mm | δ aparato mm | δ lineal (ΔH) mm | δ vol ($\Delta H/H$) % | Δe | e | V_f cm ³ |
|-------------------------------|----------------------|------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|------------|--------|--------------------------|
| Lec inicial | 18.895 | | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 7.2771 | 100.028 |
| 0.100 | 18.738 | 0.010 | 0.147 | 0.739 | 0.061 | 7.2160 | 99.289 |
| 0.300 | 18.433 | 0.031 | 0.431 | 2.166 | 0.179 | 7.0978 | 97.862 |
| 0.500 | 18.112 | 0.050 | 0.733 | 3.683 | 0.305 | 6.9722 | 96.344 |
| 0.800 | 17.070 | 0.072 | 1.753 | 8.809 | 0.729 | 6.5480 | 91.217 |
| 1.000 | 15.462 | 0.083 | 3.350 | 16.834 | 1.393 | 5.8837 | 83.189 |
| 1.500 | 12.950 | 0.100 | 5.845 | 29.372 | 2.431 | 4.8460 | 70.648 |
| 2.000 | 11.480 | 0.115 | 7.300 | 36.683 | 3.036 | 4.2408 | 63.335 |
| 0.500 | 11.932 | 0.070 | 6.893 | 34.638 | 2.867 | 4.4101 | 65.380 |
| 0.100 | 12.720 | 0.035 | 6.140 | 30.854 | 2.554 | 4.7233 | 69.165 |
| 0.000 | 13.340 | 0.000 | 5.555 | 27.915 | 2.311 | 4.9666 | 72.106 |

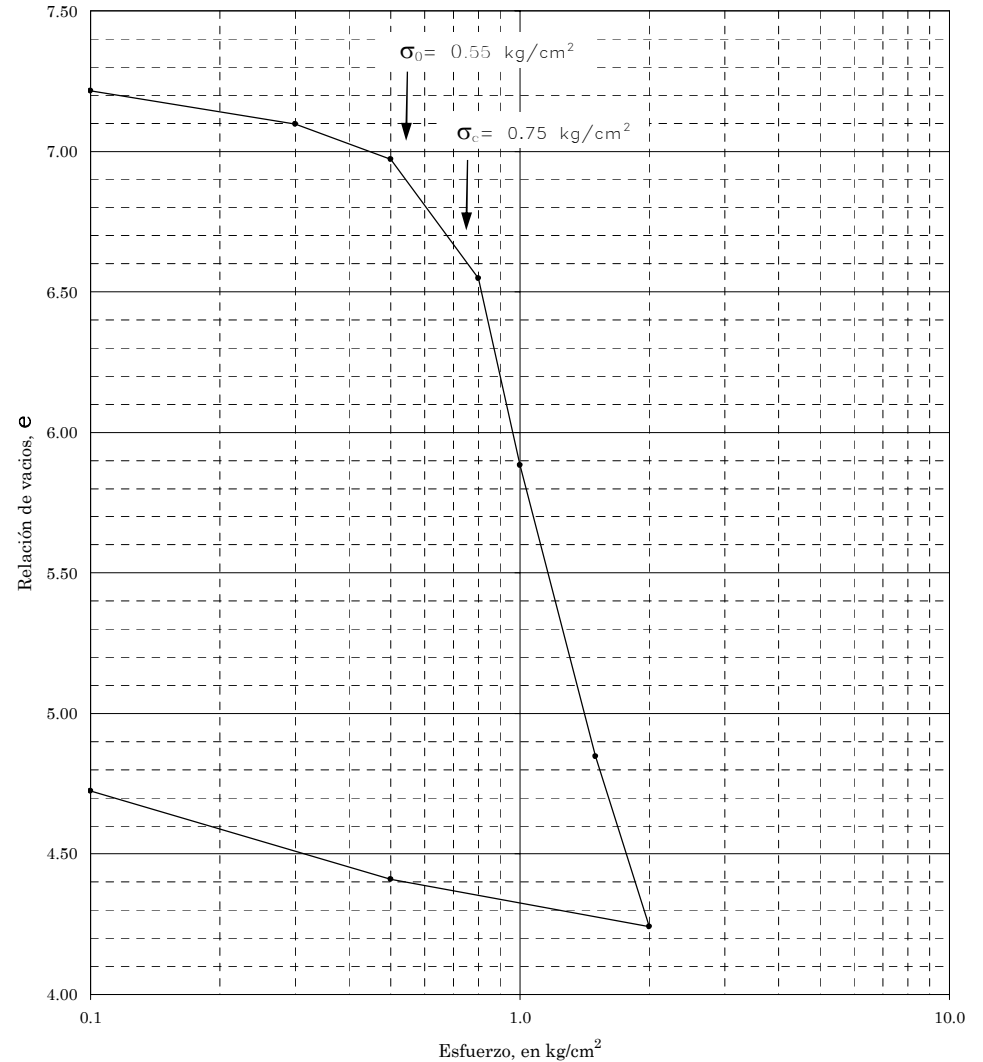


Figura 2-22

CONSOLIDACION

| | | | | | | | | | |
|-----------------|--|-----------------|--|-------------------------------|--|----------------|--|-------------------------|--|
| PROYECTO | | LOCALIZACION | | OPERADOR | | FECHA | | Consolidómetro No. 2 | |
| SONDEO SMS-1 | | MUESTRA 13-4 | | PROFUNDIDAD(m) 21.80-22.00 | | CALCULO MRD | | Ss 3.150 | |

Descripción del suelo:
Arcilla de alta plasticidad color café olivo oscuro

| | | | | | | | | | | |
|-----------|---|----------------|-------|----|----------------|------|----|----------------|--------|-----------------|
| Anillo No | 2 | $D_{anillo} =$ | 8.015 | cm | $H_{anillo} =$ | 1.97 | cm | $A_{anillo} =$ | 50.454 | cm ³ |
|-----------|---|----------------|-------|----|----------------|------|----|----------------|--------|-----------------|

| Antes de la prueba | | Después de la prueba | | | | | |
|----------------------|--------|----------------------|-----------------------------------|--------|----------------|-------|----|
| $W_{anillo} + W_h =$ | 292.61 | gr | Vidrio No. | 11 | $W_{vidrio} =$ | 41.32 | gr |
| $W_{anillo} =$ | 163.95 | gr | $W_{vidrio} + W_h + W_{anillo} =$ | 301.96 | gr | | |
| | | | $W_{vidrio} + W_s + W_{anillo} =$ | 238.21 | gr | | |

| | | | | | | | | | | | |
|------------------|--------|------------------|--------------|---------|-----------------|-------------|---------|-----------------|-------------|--------|-----------------|
| $W_s =$ | 32.940 | gr | $W_{h i} =$ | 128.660 | gr | $W_{w i} =$ | 95.720 | gr | $W_{h f} =$ | 96.690 | gr |
| $W_{w f} =$ | 63.750 | gr | $V_i =$ | 99.395 | cm ³ | $V_f =$ | 64.909 | cm ³ | $V_s =$ | 10.458 | cm ³ |
| $V_{v i} =$ | 88.937 | cm ³ | $V_{v f} =$ | 54.451 | cm ³ | $V_{w i} =$ | 95.720 | cm ³ | $V_{w f} =$ | 63.750 | cm ³ |
| $\gamma_{h i} =$ | 1.294 | t/m ³ | $\omega_i =$ | 290.589 | % | $G_{w i} =$ | 100.000 | % | $e_i =$ | 8.5044 | |
| $\gamma_{h f} =$ | 1.490 | t/m ³ | $\omega_f =$ | 193.534 | % | $G_{w f} =$ | 100.000 | % | $e_f =$ | 5.2068 | |

| PRESION kg/cm ² | Lec micrometro mm | δ aparato mm | δ lineal (ΔH) mm | δ vol ($\Delta H/H$) % | Δe | e | V_f cm ³ |
|-------------------------------|----------------------|------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|------------|--------|--------------------------|
| Lec inicial | 19.680 | | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 8.5044 | 99.395 |
| 0.100 | 19.548 | 0.010 | 0.122 | 0.619 | 0.059 | 8.4455 | 98.779 |
| 0.400 | 19.118 | 0.028 | 0.534 | 2.711 | 0.258 | 8.2467 | 96.700 |
| 0.650 | 18.690 | 0.035 | 0.955 | 4.848 | 0.461 | 8.0436 | 94.576 |
| 0.900 | 17.622 | 0.045 | 2.013 | 10.218 | 0.971 | 7.5332 | 89.238 |
| 1.100 | 16.220 | 0.048 | 3.412 | 17.320 | 1.646 | 6.8582 | 82.180 |
| 1.600 | 13.995 | 0.060 | 5.625 | 28.553 | 2.714 | 5.7906 | 71.014 |
| 2.000 | 12.777 | 0.068 | 6.835 | 34.695 | 3.298 | 5.2068 | 64.909 |
| 0.900 | 13.012 | 0.050 | 6.618 | 33.594 | 3.193 | 5.3115 | 66.004 |
| 0.400 | 13.361 | 0.035 | 6.284 | 31.898 | 3.032 | 5.4726 | 67.689 |
| 0.000 | 14.512 | 0.000 | 5.168 | 26.234 | 2.493 | 6.0110 | 73.320 |

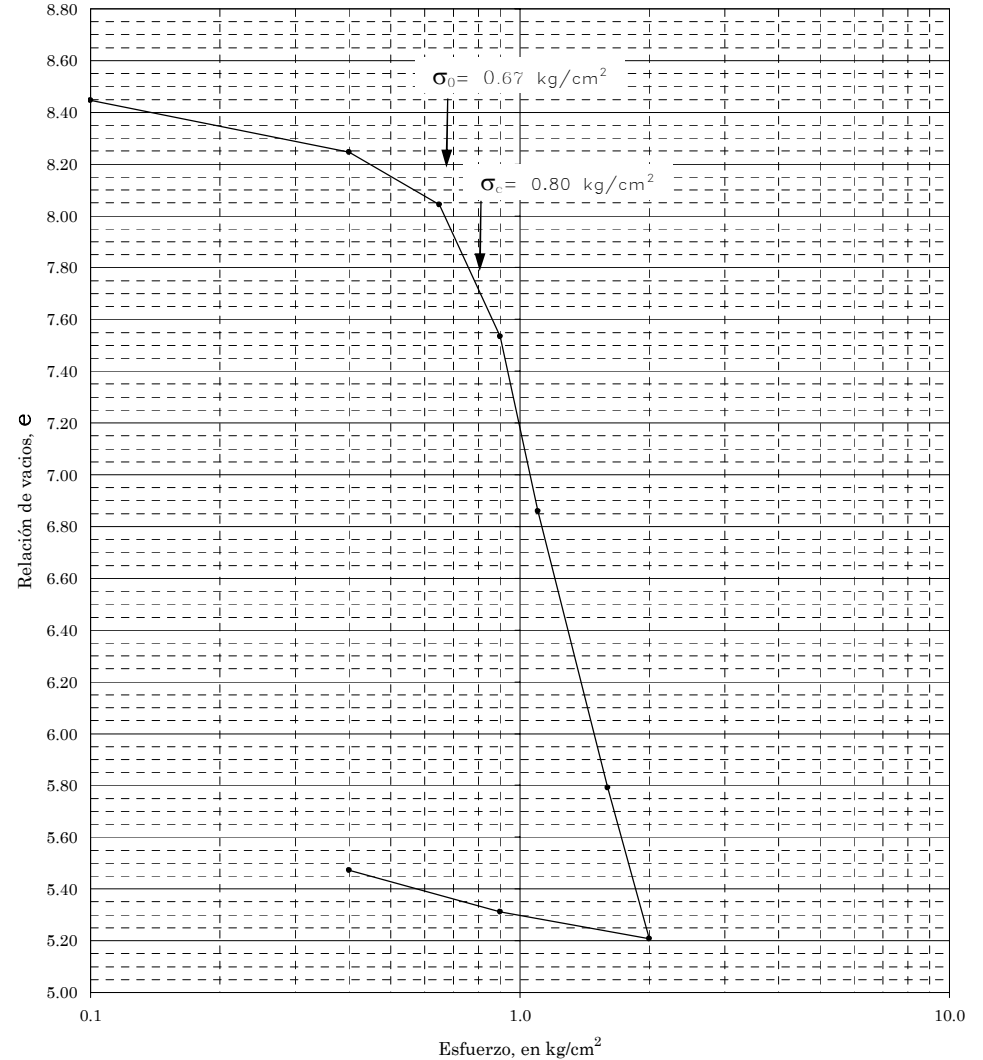


Figura 2-23

CONSOLIDACION

| | | | | |
|-----------------|-----------------|-------------------------|----------------|-------------------------|
| PROYECTO | LOCALIZACION | OPERADOR | FECHA | Consolidómetro No. 3 |
| SONDEO SMS-1 | MUESTRA 14-3 | PROFUNDIDAD(m) 27.30 | CALCULO MRD | Ss 2.944 |

Descripción del suelo:
Arcilla de alta plasticidad color café olivo

| | | | | |
|-----------|---|-------------------------|------------------------|---------------------------------------|
| Anillo No | 3 | $D_{anillo} = 7.985$ cm | $H_{anillo} = 1.99$ cm | $A_{anillo} = 50.077$ cm ³ |
|-----------|---|-------------------------|------------------------|---------------------------------------|

| Antes de la prueba | | Después de la prueba | |
|----------------------|-----------|-----------------------------------|-----------|
| $W_{anillo} + W_h =$ | 294.88 gr | Vidrio No. | 14 |
| $W_{anillo} =$ | 166.58 gr | $W_{vidrio} =$ | 53.71 gr |
| | | $W_{vidrio} + W_h + W_{anillo} =$ | 322.91 gr |
| | | $W_{vidrio} + W_s + W_{anillo} =$ | 255.76 gr |

| | | | | | | | |
|-----------------|------------------------|--------------|------------------------|------------|------------------------|------------|------------------------|
| $W_s =$ | 35.470 gr | $W_{hi} =$ | 128.300 gr | $W_{wi} =$ | 92.830 gr | $W_{hf} =$ | 102.620 gr |
| $W_{wf} =$ | 67.150 gr | $V_i =$ | 99.654 cm ³ | $V_f =$ | 65.035 cm ³ | $V_s =$ | 12.048 cm ³ |
| $V_{vi} =$ | 87.606 cm ³ | $V_{vf} =$ | 52.987 cm ³ | $V_{wi} =$ | 92.830 cm ³ | $V_{wf} =$ | 67.150 cm ³ |
| $\gamma_{hi} =$ | 1.287 t/m ³ | $\omega_i =$ | 261.714 % | $G_{wi} =$ | 100.000 % | $e_i =$ | 7.2716 |
| $\gamma_{hf} =$ | 1.578 t/m ³ | $\omega_f =$ | 189.315 % | $G_{wf} =$ | 100.000 % | $e_f =$ | 4.3981 |

| PRESION kg/cm ² | Lec micrometro mm | δ aparato mm | δ lineal (ΔH) mm | δ vol ($\Delta H/H$) % | Δe | e | V_f cm ³ |
|-------------------------------|----------------------|------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|------------|--------|--------------------------|
| Lec inicial | 18.410 | | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 7.2716 | 99.654 |
| 0.100 | 18.222 | 0.009 | 0.179 | 0.899 | 0.074 | 7.1972 | 98.757 |
| 0.400 | 17.847 | 0.040 | 0.523 | 2.628 | 0.217 | 7.0542 | 97.035 |
| 0.700 | 17.588 | 0.051 | 0.771 | 3.874 | 0.320 | 6.9511 | 95.793 |
| 1.100 | 17.292 | 0.065 | 1.053 | 5.291 | 0.438 | 6.8339 | 94.380 |
| 1.600 | 16.900 | 0.081 | 1.429 | 7.181 | 0.594 | 6.6776 | 92.498 |
| 2.500 | 15.763 | 0.108 | 2.539 | 12.759 | 1.055 | 6.2162 | 86.939 |
| 3.500 | 12.928 | 0.133 | 5.349 | 26.879 | 2.223 | 5.0482 | 72.867 |
| 4.500 | 11.342 | 0.155 | 6.913 | 34.739 | 2.873 | 4.3981 | 65.035 |
| 1.100 | 12.128 | 0.080 | 6.202 | 31.166 | 2.578 | 4.6937 | 68.596 |
| 0.100 | 13.245 | 0.022 | 5.143 | 25.844 | 2.138 | 5.1338 | 73.899 |
| 0.000 | 14.068 | 0.000 | 4.342 | 21.819 | 1.805 | 5.4668 | 77.910 |

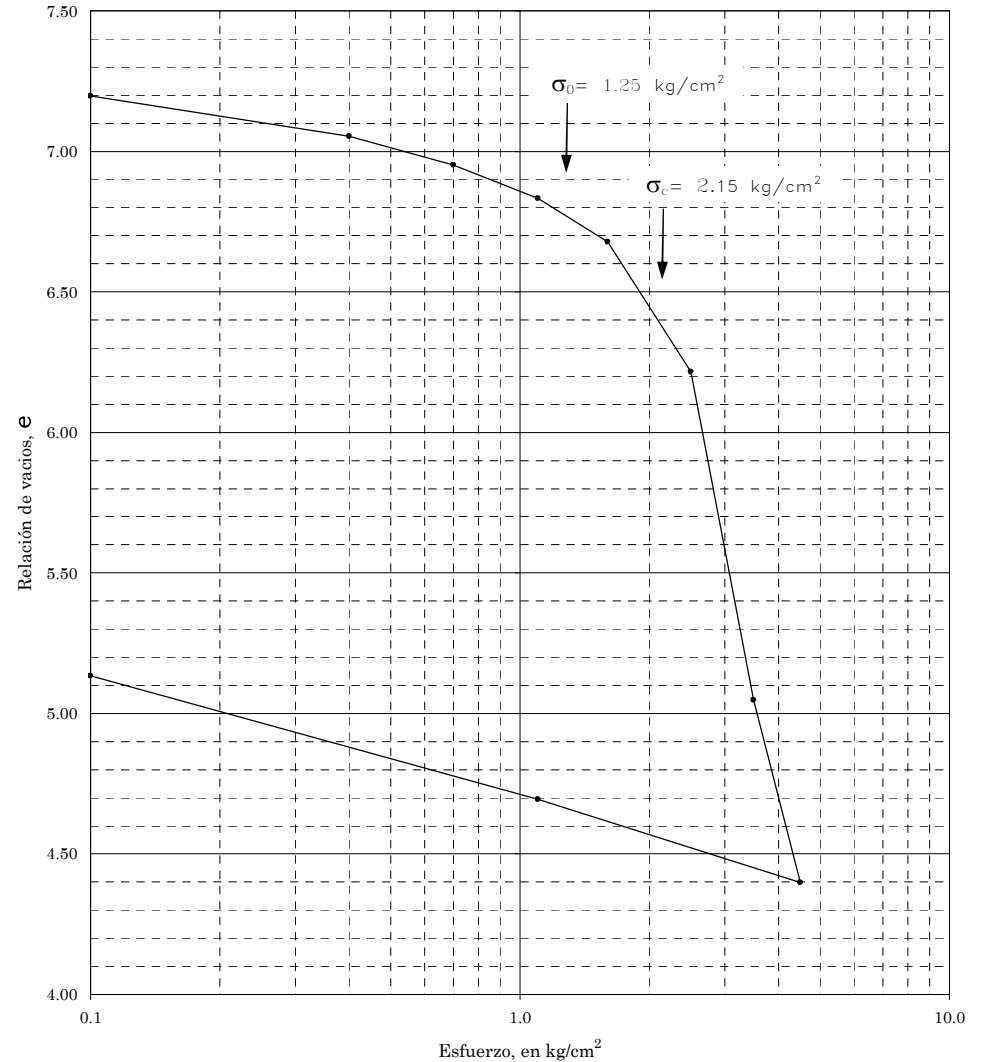


Figura 2-24

CONSOLIDACION

| | | | | |
|----------|--------------|----------------|---------|--------------------|
| PROYECTO | LOCALIZACION | OPERADOR | FECHA | Consolidómetro No. |
| SONDEO | MUESTRA | PROFUNDIDAD(m) | CALCULO | 4 |
| SMS-1 | 15-3 | 34.40-34.60 | MRD | Ss 2.944 |

Descripción del suelo:
Arcilla de alta plasticidad color café olivo

| | | | | |
|-----------|---|-------------------------|------------------------|---------------------------------------|
| Anillo No | 4 | $D_{anillo} = 8.000$ cm | $H_{anillo} = 1.99$ cm | $A_{anillo} = 50.265$ cm ³ |
|-----------|---|-------------------------|------------------------|---------------------------------------|

| Antes de la prueba | | Después de la prueba | |
|----------------------|-----------|-----------------------------------|-----------|
| $W_{anillo} + W_h =$ | 308.20 gr | Vidrio No. | 13 |
| | | $W_{vidrio} =$ | 56.50 gr |
| $W_{anillo} =$ | 167.53 gr | $W_{vidrio} + W_h + W_{anillo} =$ | 336.85 gr |
| | | $W_{vidrio} + W_s + W_{anillo} =$ | 280.83 gr |

| | | | | | | | |
|------------------|------------------------|--------------|-------------------------|-------------|------------------------|-------------|------------------------|
| $W_s =$ | 56.800 gr | $W_{h_i} =$ | 140.670 gr | $W_{w_i} =$ | 83.870 gr | $W_{h_f} =$ | 112.820 gr |
| $W_{w_f} =$ | 56.020 gr | $V_i =$ | 100.028 cm ³ | $V_f =$ | 67.582 cm ³ | $V_s =$ | 19.293 cm ³ |
| $V_{v_i} =$ | 80.736 cm ³ | $V_{v_f} =$ | 48.289 cm ³ | $V_{w_i} =$ | 83.870 cm ³ | $V_{w_f} =$ | 56.020 cm ³ |
| $\gamma_{h_i} =$ | 1.406 t/m ³ | $\omega_i =$ | 147.658 % | $G_{w_i} =$ | 100.000 % | $e_i =$ | 4.1848 |
| $\gamma_{h_f} =$ | 1.669 t/m ³ | $\omega_f =$ | 98.627 % | $G_{w_f} =$ | 100.000 % | $e_f =$ | 2.5030 |

| PRESION kg/cm ² | Lec micrometro mm | δ aparato mm | δ lineal (ΔH) mm | δ vol ($\Delta H/H$) % | Δe | e | V_f cm ³ |
|-------------------------------|----------------------|------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|------------|--------|--------------------------|
| Lec inicial | 19.202 | | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 4.1848 | 100.028 |
| 0.100 | 19.112 | 0.007 | 0.083 | 0.417 | 0.022 | 4.1632 | 99.611 |
| 0.500 | 18.822 | 0.037 | 0.343 | 1.724 | 0.089 | 4.0954 | 98.304 |
| 0.900 | 18.620 | 0.048 | 0.534 | 2.683 | 0.139 | 4.0457 | 97.344 |
| 1.500 | 18.329 | 0.062 | 0.811 | 4.075 | 0.211 | 3.9735 | 95.952 |
| 2.200 | 17.882 | 0.069 | 1.251 | 6.286 | 0.326 | 3.8588 | 93.740 |
| 3.500 | 15.570 | 0.080 | 3.552 | 17.849 | 0.925 | 3.2593 | 82.174 |
| 5.000 | 13.608 | 0.093 | 5.501 | 27.643 | 1.433 | 2.7515 | 72.377 |
| 6.500 | 12.642 | 0.105 | 6.455 | 32.437 | 1.682 | 2.5030 | 67.582 |
| 1.500 | 13.172 | 0.070 | 5.960 | 29.950 | 1.553 | 2.6320 | 70.070 |
| 0.100 | 13.875 | 0.012 | 5.315 | 26.709 | 1.385 | 2.8000 | 73.312 |
| 0.000 | 14.420 | 0.000 | 4.782 | 24.030 | 1.246 | 2.9389 | 75.991 |

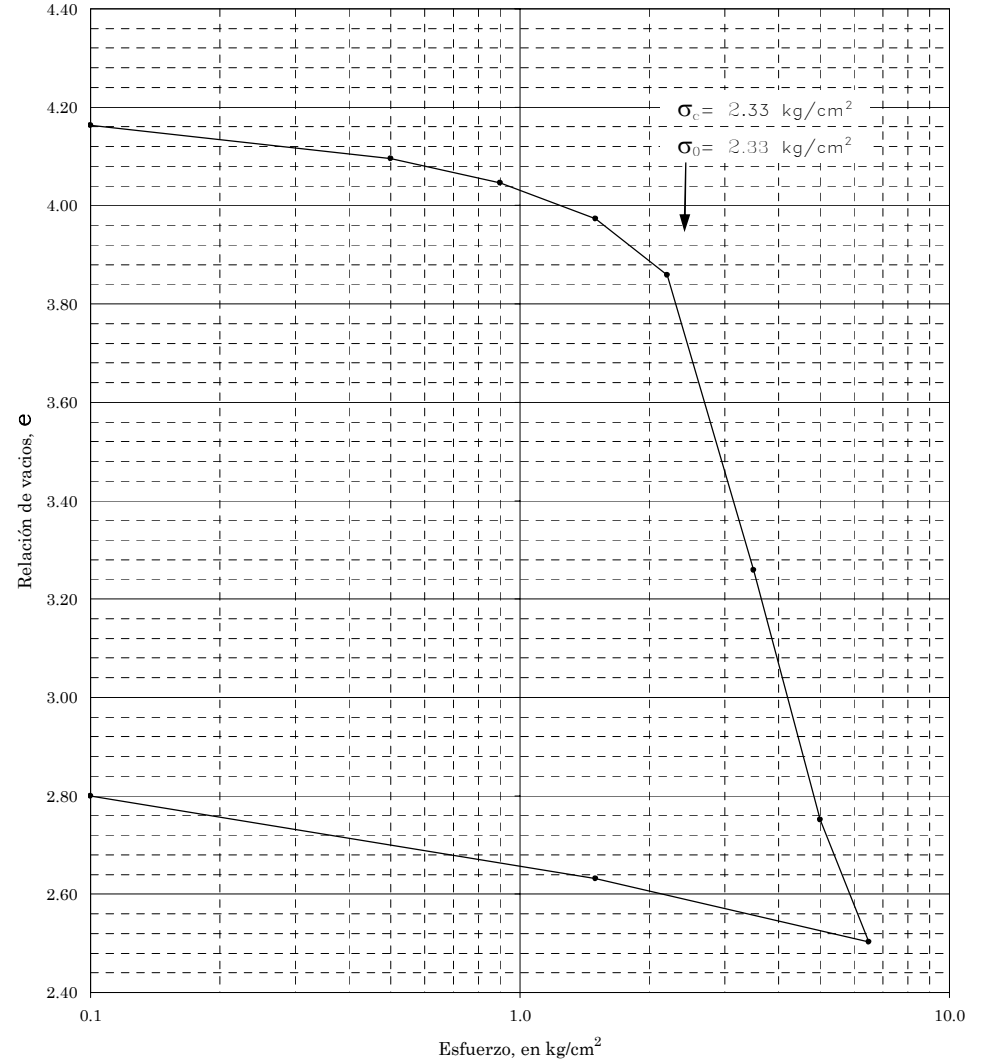


Figura 2-25