



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO**

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN
INGENIERÍA**

INSTITUTO DE INGENIERÍA

**DISEÑO Y CONSTRUCCION DELUMBRERAS EN
SUELOS BLANDOS POR EL PROCEDIMIENTO DE
LOS ANILLOS PREFABRICADOS**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

**MAESTRO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL – MECÁNICA DE SUELOS**

**P R E S E N T A :
ING. SLOBODAN ZEMVA TANASIJEVIC**

DIRECTOR DE TESIS: DR. GABRIEL AUVINET GUICHARD

MÉXICO D.F., CIUDAD UNIVERSITARIA

2011





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

Presidente: DR. ROBERTO MELI PIRALLA
Secretario: DR. GABRIEL AUVINET GUICHARD
Vocal: DR. MANUEL MENDOZA LÓPEZ
1^{er} Suplente: DR. EFRAÍN OVANDO SHELLEY
2^{do} Suplente: DR. RAFAEL CARMONA PAREDES

Lugar donde se realizó la tesis:

Instituto de Ingeniería de la UNAM, Ciudad Universitaria.

Tutor de tesis:

Dr. Gabriel Auvinet Guichard

Firma

**A mis padres y esposa, por su apoyo y confianza depositada en un
servidor**

Agradecimientos

Mi agradecimiento al Dr. Gabriel Auvinet Guichard por la oportunidad y confianza mostrada en sus estudiantes sin distinción alguna.

Mi más profundo y sincero agradecimiento a cada uno de los invaluable profesores que conocí en esta máxima casa de estudios por compartir conmigo sus conocimientos y experiencias obtenidas en el ámbito de la ingeniería.

RESUMEN

Se describe el procedimiento de construcción de lumbreras con anillos prefabricados ideados y desarrollados en el ambiente de las zonas urbanas de la Ciudad de México. Se indica la zonificación y las condiciones geotécnicas de las Zonas de Lago y de Transición del Valle de México. Se menciona una breve historia de los procedimientos de construcción y las fallas de las lumbreras en suelos blandos del Valle de México.

El procedimiento de construcción de las lumbreras de anillos prefabricados se describe paso a paso desde la construcción de los brocales hasta su terminación, con todas las preparaciones para iniciar o terminar el tramo de túnel. La secuencia del procedimiento constructivo inicia con la construcción de los brocales, y sigue con la excavación de la trinchera perimetral estabilizada con los lodos bentoníticos, la excavación del núcleo, la sumersión del primer anillo, el colado de la primera losa del fondo, la sumersión de los anillos superiores, el relleno perimetral con el suelo-cemento-bentonita, el retiro de los lodos del interior de la lumbrera y concluye con la construcción del revestimiento definitivo y de los portales de salida y entrada de la máquina tunelera (escudo).

Se presentan los análisis de estabilidad y de desplazamientos ligados a la secuencia de procedimiento constructivo como es la excavación de la trinchera perimetral, la excavación del núcleo. En el caso de fuertes abatimientos de presiones de agua subterránea los esfuerzos de subsuelo totales normales en el sentido horizontal sufren una significativa disminución. En este caso las presiones de lodos bentoníticos pueden provocar el incremento de diámetro de la excavación y ocasionalmente el agrietamiento radial de suelo y pérdida de lodos. A largo plazo el hundimiento regional provoca los desplazamientos diferenciales de los colectores superficiales y de túnel en relación con el cuerpo de la lumbrera. Para evitar estos daños es necesario implementar las conexiones con las juntas flexibles que permiten rotación y translación. El análisis sísmico de interacción suelo-lumbrera define la posición más desfavorable de la lumbrera ubicada en la zona de la inflexión de la onda sísmica. La zona superior de la lumbrera es crítica y requiere el refuerzo para evitar eventuales colapsos durante los sismos.

De las lumbreras proyectadas se selecciona una lista de 30 lumbreras, de las cuales se construyeron 28. Se indican los diámetros interiores de lumbreras entre los 5.00m y 22.00m, y las profundidades hasta los 33.00m. Se utilizan como captaciones, obras auxiliares de túneles y en plantas de bombeo de aguas negras como para los cárcamos de bombeo, las estructuras de rejillas y las captaciones. Los portales de entrada y salida de túnel permitieron la eliminación del procedimiento de restitución de suelo con el mortero (“el mejoramiento”) en las zonas de entrada y salida de túnel y/o tubo hincado.

El alto grado de seguridad, rapidez, sencillez, y bajo costo de las lumbreras construidas con anillos prefabricados favoreció su utilización en muchas obras de Drenaje Profundo de la Ciudad de México

ABSTRACT

Mexico City deep stormwater and sewage mixed system consists of an ample, constantly increasing network of tunnels, situated in a very soft subsoil environment, subjected to a permanent subsidence, as a consequence of ground water pressure drawdown. Shafts are the first structures to build in the development of this system because of two main reasons: to start and assist tunnel construction as well as to collect, convey and remove surface sewage and rain waters. In order to accelerate, simplify, and diminish the shafts construction costs and to increase safety, the “Precast Ring” method was proposed, and was used to create more than 30 cylindrical shafts. It is pointed out the construction sequence and important geotechnical analysis steps during critical construction episodes with the least factor of safety.

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	16
1.1	ANTECEDENTES	16
1.1.1	<i>Condiciones geotécnicas del Valle de México</i>	16
1.1.2	<i>Breve historia de las obras hidráulicas en el Valle de México</i>	18
1.1.3	<i>Procedimientos anteriores de construcción de las lumbreras en el Valle de México y los problemas que se presentaron durante la construcción</i>	19
1.1.3.1	Generalidades	19
1.1.3.2	Procedimientos de construcción	21
1.1.3.2.1	Técnica Solum	21
1.1.3.2.2	Técnica Soletanche	24
1.1.3.2.3	Técnica de Icos	27
1.1.3.2.4	Técnica Ipsa	32
1.1.3.2.5	Lumbreras flotadas con el método Cravioto	34
1.2	CASOS DE FALLA EN LAS LUMBRERAS 6 Y 7 DEL INTERCEPTOR ORIENTE	43
1.2.1	<i>Descripción breve de las fallas</i>	43
1.2.2	<i>Lumbrera 6 del Interceptor Oriente</i>	43
1.2.3	<i>Lumbrera 7 del Interceptor Oriente</i>	45
1.2.4	<i>La rehabilitación de las Lumbreras 6 y 7</i>	47
1.3	OBJETIVOS	47
1.4	ALCANCES	48
2	DESCRIPCIÓN DEL PROCEDIMIENTO	49
2.1	CONSTRUCCIÓN DE LOS BROCALES	49
2.2	EXCAVACIÓN DEL SUELO PARA ALOJAR LA LUMBRERA	51
2.2.1	<i>Excavación de la trinchera perimetral</i>	52
2.2.2	<i>Demolición y retiro del brocal interior y excavación del núcleo para alojar la lumbrera</i>	56
2.3	CONSTRUCCIÓN DE LOS ANILLOS SEGMENTADOS	58
2.3.1	<i>Definición del material de mortero para su implementación en la zona del portal</i>	70
2.3.1.1	Preparación de mortero	70
2.3.1.2	Descripción de los materiales que constituyen el mortero del portal	71
2.3.1.3	Descripción del mezclado de mortero	72
2.3.1.4	El vibrado y el curado del mortero	72
2.3.1.5	El tratamiento de las juntas de colado en las superficies de contacto con el concreto endurecido	73
2.3.1.6	La impermeabilización de las superficies exteriores de mortero	73
2.3.2	<i>El concreto y el acero de refuerzo para los anillos</i>	73
2.3.3	<i>El acero estructural utilizado en los anillos</i>	73
2.4	COLOCACIÓN DEL PRIMER ANILLO	74
2.5	COLADO DE LA PRIMERA LOSA DE FONDO	76
2.6	SUMERSIÓN DE LOS ANILLOS SUPERIORES	79
2.7	COLOCACIÓN DEL RELLENO PERIMETRAL ENTRE LOS ANILLOS Y EL SUELO NATURAL	81
2.7.1	<i>Descripción del relleno perimetral a base de mezcla mortero-bentonita</i>	83
2.7.2	<i>Preparación de la mezcla de mortero-bentonita</i>	83

2.7.3	<i>Descripción de los materiales que constituyen el material mortero-bentonita</i>	84
2.7.4	<i>El mezclado y colocación del mortero-bentonita</i>	84
2.8	RETIRO DE LOS LODOS DEL INTERIOR DE LA LUMBRERA	84
2.9	CONSTRUCCIÓN DEL REVESTIMIENTO DEFINITIVO	85
2.9.1	<i>Construcción de la losa de fondo definitiva y de la parte inferior de los muros hasta el nivel inferior de mortero del portal</i>	86
2.9.2	<i>Construcción del revestimiento definitivo de la lumbrera fuera de la zona de los portales y construcción del portal con el mortero y concreto reforzado</i>	88
3	ANÁLISIS GEOTÉCNICOS DE ESTABILIDAD Y DE DESPLAZAMIENTOS	91
3.1	SUPOSICIONES DE TRABAJO EN LOS ANÁLISIS GEOTÉCNICOS Y DE INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA	92
3.2	ANÁLISIS A CORTO PLAZO SIGUIENDO LAS SITUACIONES CRÍTICAS DE LA SECUENCIA DE CONSTRUCCIÓN DE LA LUMBRERA	93
3.2.1	<i>Estabilidad de la trinchera perimetral</i>	93
3.2.2	<i>Estabilidad del fondo de la excavación</i>	100
3.2.3	<i>Estabilidad de las zonas críticas como son los portales durante la construcción y durante las maniobras de escudo o tubo hincado</i>	107
3.2.4	<i>Análisis de los desplazamientos de suelo en el sitio de construcción durante la obra</i>	119
3.3	ANÁLISIS A LARGO PLAZO	127
3.3.1	<i>Análisis de los desplazamientos de lumbrera-túnel a largo plazo tomando en cuenta el hundimiento regional</i>	129
3.3.2	<i>Análisis de la estabilidad lumbrera-túnel durante la ocurrencia de los sismos</i>	131
4	CASOS DE LUMBRERAS CONSTRUIDAS POR EL MÉTODO DE ANILLOS PREFABRICADOS	145
4.1	LUMBRERAS DE PEQUEÑO DIÁMETRO INTERIOR DE 5.0 METROS, PARA LAS CAPTACIONES, DONDE LAS LÍNEAS DE DRENAJE SUPERFICIALES SE CONECTAN CON EL TÚNEL DE DRENAJE PROFUNDO	150
4.2	LUMBRERAS DE DIÁMETRO INTERIOR INTERMEDIO DE 12 METROS, PARA LA CONSTRUCCIÓN Y MANTENIMIENTO DE TÚNELES DE DRENAJE PROFUNDO Y COMO CAPTACIÓN	150
4.3	LUMBRERAS DE GRANDES DIÁMETROS, MAYORES DE 16 METROS PARA LAS LUMBRERAS DE REJILLAS Y LOS CÁRCAMOS DE BOMBEO DE LAS PLANTAS DE BOMBEO DE AGUAS NEGRAS CON CAPACIDADES A PARTIR DE LOS 20 M ³ /S HASTA LOS 80M ³ /s	151
5	CONCLUSIONES	153
5.1	EL GRADO DE SEGURIDAD	153
5.2	LA IMPORTANCIA DE LA ELIMINACIÓN DE LA RESTITUCIÓN DE SUELO NATURAL CON EL MORTERO EN LAS ZONAS DE SALIDA Y ENTRADA DE LOS ESCUDOS O TUBOS HINCADOS A LAS LUMBRERAS	154
5.2	LA RAPIDEZ DE LA OBRA DE CONSTRUCCIÓN	154
5.3	LOS AHORROS Y LOS FACTORES ECONÓMICOS QUE RIGEN LAS LUMBRERAS DE LOS ANILLOS	154
5.4	SENCILLEZ DEL PROCEDIMIENTO PARA LAS COMPAÑÍAS CONSTRUCTORAS SIN TECNOLOGÍAS, EXPERIENCIAS Y MAQUINARIA ALTAMENTE SOFISTICADAS	155
5.5	UTILIZACIÓN DE LAS LUMBRERAS CONSTRUIDAS POR EL MÉTODO DE ANILLOS EN OTROS TIPOS DE PROYECTOS	155

Lista de figuras

Figura 1. Zonificación geotécnica de la ciudad de México (GDF, NTCDCC 2004).	16
Figura 2. Valores medios típicos de las propiedades índice de la zona del Lago. Perforación Pc 28 (Marsal, 1975, referencia i).	17
Figura 3. Primera etapa del sistema de Drenaje Profundo de la ciudad de México, entre 1967 y 1975.	20
Figura 4. Técnica Solum, primeras fases.	22
Figura 5. Excavación del núcleo.	23
Figura 6. Construcción de losa de fondo en varias etapas.	24
Figura 7. Excavación de la trinchera perimetral.	25
Figura 8. Excavación del sector anular.	25
Figura 9. Tubería en los extremos del sector anular.	26
Figura 10. Paso de la construcción un sector al otro.	26
Figura 11. Las inyecciones de sello en las juntas con filtraciones.	27
Figura 12. Preliminares: el trazo y los brocales.	28
Figura 13. El colado de los muros de la lumbrera, revestimiento primario.	29
Figura 14. Tubería en las juntas de colado.	29
Figura 15. Corona, 1er anillo y 1era serie de columnas.	30
Figura 16. Columnas en planta.	31
Figura 17. Secuencia del procedimiento constructivo del revestimiento secundario y de la losa de fondo.	32
Figura 18. Secuencia de actividades de construcción de la lumbrera.	33
Figura 19. Trazo de la lumbrera y de los brocales.	35
Figura 20. Excavación de la zanja anular.	36
Figura 21. Excavación del núcleo.	37
Figura 22. Tanque de flotación.	38
Figura 23. Construcción de la lumbrera a base de sumersión del tanque flotador.	39
Figura 24. Inyecciones de contacto y relleno perimetral.	40
Figura 25. Losa de fondo definitiva.	41

Figura 26. Mejoramiento de suelo en la entrada y salida de escudo.....	42
Figura 27. Lumbrera 6, Interceptor Oriente.	44
Figura 28. Lumbrera 7, Interceptor Oriente.	46
Figura 29. Sección vertical diametral de los brocales interior y exterior, elevación (unidades en mm).	50
Figura 30. Dispositivo de sujeción del primer anillo incorporado en el brocal exterior en planta y elevación.....	50
Figura 31. El brocal exterior con las placas de sujeción (rectángulos rojos).	51
Figura 32. Excavación de la trinchera perimetral con almeja guiada, sección diametral, elevación y planta.....	52
Figura 33. Excavación del núcleo central restituyendo el suelo natural con lodos bentoníticos, sección diametral, elevación.	57
Figura 34. Geometría de la excavación en conjunto con el corte estratigráfico donde se indican las principales unidades, desde la superficie hacia abajo: rellenos heterogéneos (ES), formación arcillosa superior (FAS), primera capa dura (CD) y formación arcillosa inferior (FAI). Escala proporcional.....	58
Figura 35. Las ocho dovelas de CR que constituyen el anillo.	59
Figura 36. Placas de conexión entre las dovelas de concreto reforzado.	60
Figura 37. Trabes radiales como refuerzo del primer anillo.....	61
Figura 38. Las trabes guía en su parte superior se conectan con el brocal. Puede notarse la superficie de lodos bentoníticos muy cerca de la superficie de suelo, el ES y la FAS.	61
Figura 39. Conexión de las trabes-guía con las trabes radiales a través de las placas de conexión entre las dovelas de concreto reforzado.....	62
Figura 40. Ensamblando las trabes radiales, placas de conexión, dovelas de CR y vigas-guía verticales se obtiene el 1er anillo.	63
Figura 41. Segundo anillo, dovelas de concreto reforzado con zonas de mortero para facilitar el paso de la zona inferior de escudo.	64
Figura 42. Elementos de acero estructural que se implementan en el segundo anillo: elementos de conexión entre las dovelas de concreto reforzado, placas-guía en lugares de la trabe vertical-guía y marco de soporte de muro de mortero.....	65
Figura 43. El Segundo anillo ensamblado antes de su inmersión en la excavación, a su posición de proyecto.	66

Figura 44. El Tercer anillo ensamblado antes de su inmersión al interior de la excavación, a su posición de proyecto.	67
Figura 45. El Cuarto anillo ensamblado.	68
Figura 46. El anillo tipo que representa: Quinto a Decimo ensamblado.	69
Figura 47. Primer anillo instalado en el interior de la excavación. Puede notarse la superficie de lodos cercana a la superficie de suelo. También se indican las principales unidades estratigráficas del subsuelo: ES, FAS, CD y FAI.....	75
Figura 48. El espacio libre entre el primer anillo, las paredes y el fondo de la excavación. Puede notarse la FAS y CD.	76
Figura 49. Posicionamiento de los tubos tremie en los ocho sectores de 45°.	77
Figura 50. La Primera losa de fondo.....	78
Figura 51. Anillos prefabricados en el interior de la excavación, en su posición del proyecto.	80
Figura 52. Colocación del relleno perimetral con el tubo tremie. Las dos celdas vacías se muestran para ilustrar la posición de tubos para el inicio de colado. Los niveles de relleno de ben ser iguales en todas las celdas durante todo el proceso de colado.....	81
Figura 53. Colocación del relleno perimetral con el tubo tremie.....	82
Figura 54. Estructura metálica de soporte de sello.	86
Figura 55. Las estructuras metálicas de soporte de escudo y sello en el interior de la lumbrera.....	87
Figura 56. Construcción de la losa de fondo definitiva y del muro definitivo hasta el nivel inferior de las zonas de mortero en los anillos prefabricados.	88
Figura 57. Revestimiento definitivo de concreto reforzado en la zona de los portales. También, se nota un portal relleno con el mortero. El revestimiento definitivo en forma del muro cilíndrico de concreto reforzado continúa desde los portales hasta la superficie de suelo	89
Figura 58. Ilustración de la distribución de los esfuerzos normales en el sentido horizontal (σ_x) en los lados de una excavación de trinchera perimetral circular calculada como un problema axialmente simétrico donde el eje del problema coincide con el eje de la lumbrera. No se toma en cuenta la influencia de la resistencia de suelo. Unidades en t/m^2	94
Figura 59. Situación de estabilidad de una trinchera perimetral sin lodos en el subsuelo del tipo FAS.....	96

Figura 60. Distribución de los esfuerzos verticales y de las presiones hidráulicas en la masa de suelo, así como de las presiones hidrostáticas de los lodos bentoníticos en la trinchera perimetral.	97
Figura 61. Distribución de los esfuerzos horizontales efectivos y totales en la masa de suelo.	98
Figura 62. Falla de fondo en arcillas.	101
Figura 63. Falla de fondo en arcillas de la FAI en la cercanía de la primera capa dura ED.	103
Figura 64. La altura crítica de la excavación (H_c) en función de la profundidad de la superficie de la primera capa dura por debajo del fondo de la excavación (D).	104
Figura 65. Falla del fondo de la excavación por exceso de presiones hidráulicas.	107
Figura 66. Falla por extrusión de arcillas.	109
Figura 67. Estado de esfuerzos totales en la cercanía de las aberturas en el muro de lumbrera donde se pierden los esfuerzos horizontales totales de confinamiento y se propician las condiciones para la extrusión de arcillas.	110
Figura 68. Eliminación del mejoramiento de suelo en las zonas de entrada y salida de escudo.	111
Figura 69. Escudo apoyado en el anillo metálico del portal.	112
Figura 70. Escudo apoyándose en el anillo metálico, transmitiendo las fuerzas al portal y la losa de fondo por medio de la estructura del tipo silleta de tubería de acero.	113
Figura 71. Portal de entrada y salida de escudo.	114
Figura 72. Zonas de mortero en los portales de lumbrera.	114
Figura 73. Sello flexible en el portal.	115
Figura 74. Detalle de fijación del sello flexible de elastómero al anillo metálico por medio de los tornillos.	115
Figura 75. Diafragma abierto.	116
Figura 76. El detalle del diafragma abierto.	116
Figura 77. El diafragma con el diámetro de escudo.	117
Figura 78. El detalle del diafragma con el diámetro de escudo.	117
Figura 79. La configuración del sello alrededor de la camisa de escudo.	118
Figura 80. Detalle del sello alrededor del escudo.	118
Figura 81. Distribución de las presiones totales verticales y horizontales en el fondo y las paredes de la excavación, unidades en cm, elevación, corte diametral.	123

Figura 82. La configuración del modelo estructural.	124
Figura 83. Modelo con elementos SOLID 2D, axisimétricos.	125
Figura 84. Desplazamientos. Unidades en ton y m. Los valores negativos representan la compresión y positivos la tensión.	125
Figura 85. Esfuerzos horizontales. Se marca la influencia de la CD. Unidades en ton y m. Los valores negativos representan la compresión y positivos la tensión.	126
Figura 86. Esfuerzos verticales normales. Unidades en ton y m. Los valores negativos representan la compresión y positivos la tensión.	126
Figura 87. Esfuerzos horizontales perpendiculares al plano de dibujo. Unidades en ton y m. Los valores negativos representan la compresión y positivos la tensión.	127
Figura 88. Un ejemplo del hundimiento regional en la Ciudad de México. En las curvas de igual hundimiento de color rojo indican hundimientos de la superficie por año en centímetros.....	128
Figura 89. Diagrama de las velocidades del HR en función de la profundidad.	129
Figura 90. Distribución de los bancos profundos para las mediciones del HR.....	130
Figura 91. Daños en la conexión lumbrera-tubería por el HR cerca de la superficie de suelo.	131
Figura 92. Junta flexible y de expansión.	131
Figura 93. Ondas volumétricas y de superficie.	132
Figura 94. Ondas de Lamb.	132
Figura 95. Configuración de la onda sísmica, periodo fundamental que se propaga por la zona de suelos blandos.....	136
Figura 96. Modelo 3D para el análisis sísmico de interacción suelo-estructura.	137
Figura 97. Modelo estructural de la lumbrera. Vistas en 3D.....	137
Figura 98. Orientación de los componentes de los esfuerzos.....	138
Figura 99. Convención de notaciones geométricas y de propiedades mecánicas del elemento.....	138
Figura 100. Las cargas que se obtienen como el resultado de análisis de elementos SHELL4T.	138
Figura 101. El sistema de coordenadas global y local del elemento, numeración de los nodos y el número de las caras del elemento SHELL4T para la aplicación de las cargas.	139

Figura 102. Dos casos críticos de la posición de la lumbrera en relación con la onda sísmica.....	140
Figura 103. Distribución de los desplazamientos sísmicos alrededor de la lumbrera. .	141
Figura 104. Varias vistas de los desplazamientos sísmicos de la lumbrera.	141
Figura 105. Posición desfavorable de la lumbrera en relación con la onda sísmica de cortante.....	142
Figura 106. Superposición de los efectos sísmicos en las dos direcciones ortogonales.	143
Figura 107. Distribución de los esfuerzos horizontales normales por flexión en la cara exterior de la lumbrera.	144

Lista de tablas

Tabla 1. Valores medios típicos de propiedades índices en la zona del lago. (Perforación Pc-28; Marsal, 1975).....	18
Tabla 2. El rango de viscosidad Marsh en función del tipo de suelo que cruza la excavación.	54
Tabla 3. Límites de las propiedades de los lodos para su utilización como el fluido de la estabilización de la excavación, sellador de materiales permeables y medio de colado de concreto con el tubo Tremie.	55
Tabla 4 Definición de la granulometría de arena como agregado pétreo para el mortero que se incorpora en los anillos.	71
Tabla 5. Definición de la granulometría de agregado pétreo para el mortero que se incorpora en los espacios anulares entre los anillos y la pared vertical de la excavación.	84
Tabla 6. Profundidades críticas de la trinchera perimetral excavada sin lodos bentoníticos.....	95
Tabla 7. Lista de las lumbreras realizadas (28) y las que quedaron en proyecto (2). ...	149

1 Introducción

1.1 Antecedentes

1.1.1 Condiciones geotécnicas del Valle de México

El área urbana del valle de México puede ser dividida en tres principales zonas geotécnicas (referencia i): de Lomas (Zona I), de Transición (Zona II) y de Lago (Zona III). La figura 1 muestra las tres zonas definidas en el presente Reglamento de Construcciones del Distrito Federal (referencia xx). En la zona de lomas se encuentran suelos de muy alta resistencia, pero también, materiales de suelos origen volcánico heterogéneos y lava. Estos materiales contrastan con la alta compresibilidad de los suelos blandos de la zona del lago. En medio de ambas, una zona de transición es encontrada; donde capas de arcilla de origen lacustre se alternan con depósitos aluviales de arena distribuidos erráticamente.

Debido a la explotación de aguas subterráneas para el abastecimiento de la población y otros factores, en el curso del siglo XX, la ciudad de México en general ha sufrido un hundimiento que en algunos lugares supera los 10m. Datos recientes muestran que la tasa de subsidencia tiende a disminuir en determinadas zonas. Sin embargo, en las zonas urbanas de nuevo desarrollo, tales como el centro del lago de Texcoco y de los antiguos lagos de Xochimilco y Chalco, en el sur del valle, el proceso de consolidación está en su primera etapa y la tasa de hundimiento alcanza más de 30 cm por año.

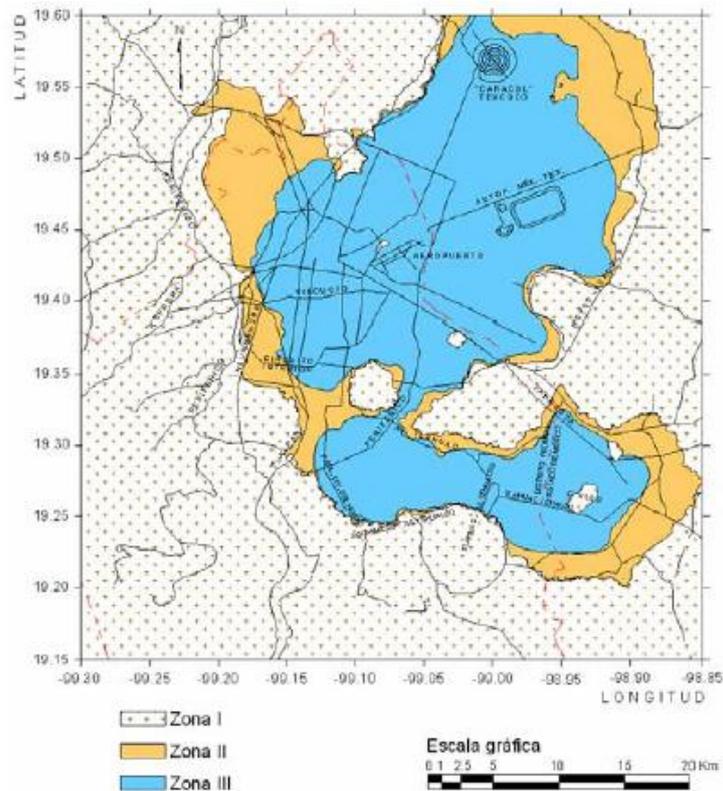


Figura 1. Zonificación geotécnica de la ciudad de México (GDF, NTCDDC 2004).

En la figura 2, un perfil típico del suelo correspondiente a la zona del Lago es presentado (Pc 28), la profundidad está en metros y el nivel de aguas freáticas está cercano a la superficie. Tres capas de arcilla son distinguidas; la primera, Formación Arcillosa Superior (FAS), la segunda, Formación Arcillosa Inferior (FAI) y la tercera conformada por los depósitos profundos (DP). Las arcillas de la FAS son separadas de la FAI por una capa dura (CD), la cual es un estrato de arena arcillosa de algunos tres metros de espesor y suele encontrarse a la profundidad de 30m a 35m. Generalmente la FAS está cubierta por una corteza desecada y/o rellenos artificiales de varios metros de espesor. Los valores medios de las propiedades índices de la perforación Pc 28 son presentados en la tabla 1. En algunas áreas de la zona lacustre, las arcillas pueden presentar una resistencia al esfuerzo cortante más baja que los valores indicados en la tabla 2.1, y valores promedios $q_u = 40 \text{ kN/m}^2$ para la FAS son comunes.

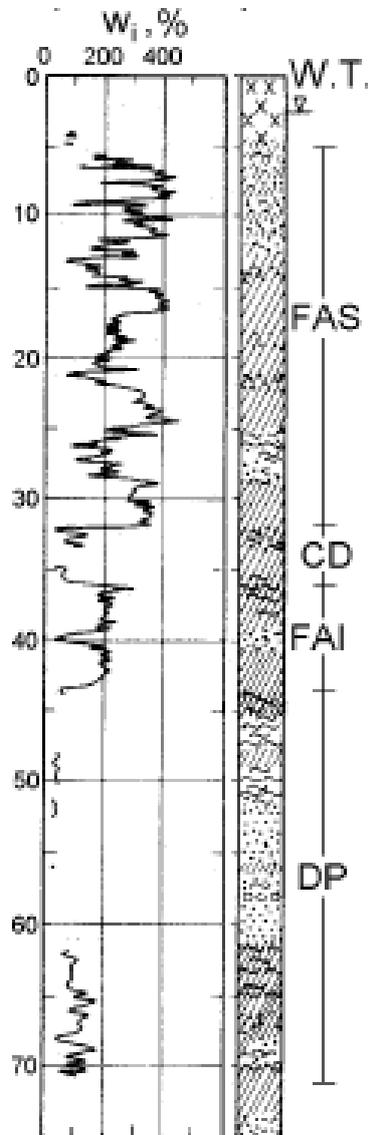


Figura 2. Valores medios típicos de las propiedades índice de la zona del Lago. Perforación Pc 28 (Marsal, 1975, referencia i).

PROPIEDAD	FAS	CD	FAI
Contenido de agua %	270	58	191
Límite Líquido LI, %	300	59	288
Límite Plástico Lp, %	86	45	68
Densidad de Sólidos, Ss	2.3	2.58	2.31
Relación Inicial de Vacíos, e _o	6.17	1.36	4.53
Esfuerzo cortante de compresión simple q _u (KN/m ²)	85	24	160

Tabla 1. Valores medios típicos de propiedades índices en la zona del lago. (Perforación Pc-28; Marsal, 1975).

1.1.2 Breve historia de las obras hidráulicas en el Valle de México

La ciudad de México (referencia ii), desde la antigüedad ha presentado serios problemas para desalojar las aguas que confluyen en ella, por estar ubicada en un valle de origen lacustre rodeado de montañas, sin salidas naturales y a una altura promedio de 2,240 msnm, donde además, se presentan temporadas de lluvias intensas y de corta duración. En estas temporadas, los primeros habitantes de la ciudad tuvieron dificultades con el crecimiento de los niveles de los lagos, que provocaba graves daños; por lo cual, las autoridades de esa época se abocaron a construir bordos y diques, sin crear todavía ningún sistema para su desalojo.

En 1555 se construyó el albarradón de San Lázaro en la zona centro de la ciudad y en 1607 se inició la construcción de un túnel en la zona de Nochistongo, al noroeste del valle de México. Debido a la falta de revestimiento, este túnel quedó inutilizado y se decidió sustituirlo por un tajo. De esta manera, el valle dejó de ser una cuenca cerrada, al contar con esta primera salida artificial de agua, lo cual alteró la ecología de la región, debido a que el nivel de los lagos ya no crecía como antes y al crear con los diques áreas seguras, la población se concentró en las orillas de los antiguos lagos.

A mediados del siglo XIX, el nivel de las inundaciones alcanzaba hasta 3 m de altura, por lo que se realizó un proyecto para el desagüe de la ciudad a través de la construcción de un gran canal y el primer túnel de Tequisquiac (segunda salida artificial), obras que se terminaron en 1900. Esta primera red de drenaje por gravedad, consistía en un sistema de tuberías que descargaba al gran canal, la cual fue terminada en 1930, pero a consecuencia del crecimiento demográfico, este sistema se volvió insuficiente. La situación también se agravó con el problema de hundimientos del suelo por consolidación regional (explotación de los acuíferos), lo que trajo como consecuencia el mal funcionamiento de la red de drenaje y la disminución de su

capacidad para desalojar las aguas fuera del valle; esto hizo necesaria la ampliación del gran canal y la construcción del segundo túnel de Tequisquiac en 1950, constituyendo la tercera salida artificial, independientemente de que la red de drenaje proyectada para trabajar por gravedad requería de bombeo para elevar las aguas hasta el nivel del gran canal.

Con objeto de recibir y desalojar las aguas del oeste de la cuenca y descargarlas a través del tajo de Nochistongo, en 1960 se construyeron el Interceptor y el Emisor del Poniente. Para 1970, nuevamente el crecimiento poblacional de la ciudad y el incremento de los hundimientos del terreno, provocaron la insuficiencia de las capacidades del drenaje del gran canal y del emisor del poniente.

El hundimiento del terreno de la ciudad había sido tal, que el nivel del lago de Texcoco, que en 1910 se hallaba de 1.9 m por debajo del centro de la ciudad, se encontraba a 5.5 m más arriba en 1970. Por esta razón, era necesario crear un sistema de drenaje que no fuera afectado por los asentamientos del terreno, que no necesitara bombeo y que desalojara las agua por una cuarta salida artificial, de esta manera surgió la construcción del Sistema de Drenaje Profundo de la ciudad de México.

1.1.3 Procedimientos anteriores de construcción de las lumbreras en el Valle de México y los problemas que se presentaron durante la construcción

1.1.3.1 Generalidades

Las obras subterráneas del Sistema de Drenaje Profundo y del Metro de la ciudad de México, por su magnitud y por las características subsuelo, han dejado grandes experiencias en la construcción de lumbreras en suelos blandos (referencia ii).

Las lumbreras son accesos verticales o inclinados para realizar a través de ellos todas las operaciones auxiliares en la construcción de un túnel: excavación, ventilación, bombeo, rezaga, transporte vertical, instalaciones eléctricas y de aire comprimido, acceso de personal, etc. Estas obras han servido también para la captación de las aguas de colectores superficiales para llevarlos al Drenaje Profundo

La primera etapa del Sistema de Drenaje Profundo de la ciudad, desarrollada entre 1967 y 1975, comprendió la construcción de 67.9 km de túneles (figura 3). En ese periodo se construyeron más de 40 lumbreras, siete de ellas en suelos blandos arcillosos de la Zona de Transición y de la Zona de Lago, colando, in situ, muros de concreto armado.

Las lumbreras del interceptor Poniente y Oriente son circulares de 9 m y 6 m de diámetro, revestidas con el concreto reforzado. La mayoría de estas obras están construidas en arcillas propias del Valle de México y su profundidad varía hasta 60 m.

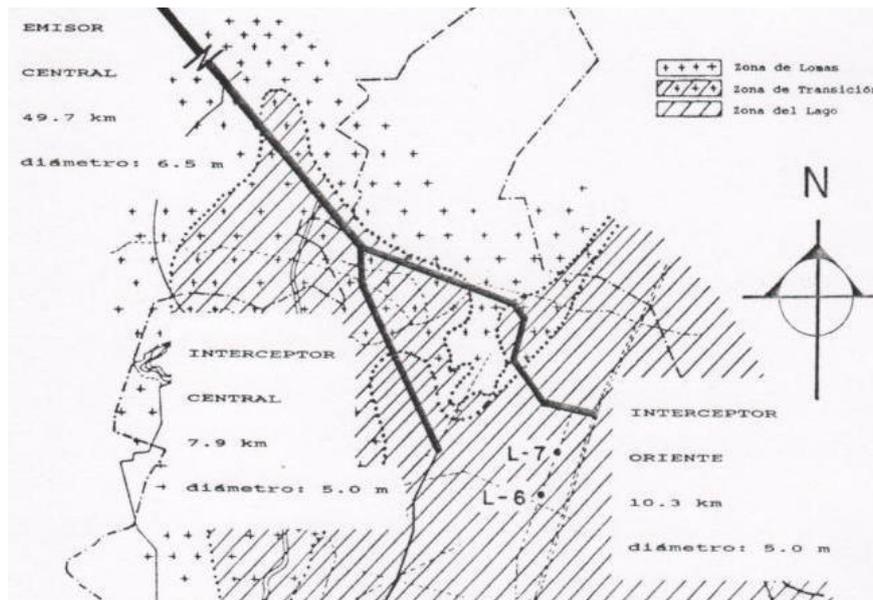


Figura 3. Primera etapa del sistema de Drenaje Profundo de la ciudad de México, entre 1967 y 1975.

Las lumbreras del Emisor Central son circulares de 6 m de diámetro terminado, revestidas con el concreto reforzado y sus profundidades varían entre 60 m y 220 m. El revestimiento es de concreto armado con un espesor promedio de 0.60 m con $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ a base de cemento tipo V, o sea cemento de alta resistencia a los sulfatos llamado "sulfacreto". Estas lumbreras atraviesan diferentes tipos de materiales, tales como: arcillas, tobas, andesitas, conglomerados, lahares, basalto, limolita, tezontle y marga.

Cabe señalar que los suelos que se han encontrado a lo largo de la línea del Emisor Central, no presentan los problemas que tienen las arcillas propias del Valle de México, por lo cual los procedimientos de construcción que se han seguido en las lumbreras de los interceptores y del Emisor Central son diferentes. Es decir, los procedimientos de construcción para lumbreras varían de acuerdo al tipo de terreno donde están construidas, y se pueden subdividir en dos grandes grupos:

- a) Lumbreras construidas en arcillas y limos, es decir, a lo largo de la línea correspondiente a los interceptores Poniente y Oriente.
- b) Lumbreras construidas en estratos más resistentes o roca, a lo largo de la línea del Emisor Central y algunas del Interceptor del Oriente.

Las lumbreras que se describen en el presente trabajo se construyen en el ambiente de suelos blandos caracterizados por muy baja resistencia al esfuerzo cortante, muy alta compresibilidad, muy baja permeabilidad, con agua subterránea en condiciones hidrodinámicas.

1.1.3.2 Procedimientos de construcción

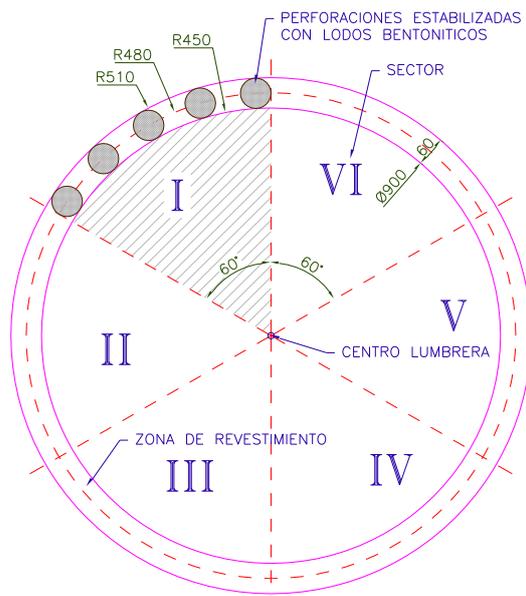
De las lumbreras construidas en la primera etapa del Sistema de Drenaje Profundo (referencia ii), en los suelos blandos arcillosos de la Zona de Transición y de la Zona de Lago del subsuelo de la ciudad de México, aunque no se contaba con precedentes nacionales, si se conocían algunas experiencias extranjeras: tres de ellas se realizaron con la técnica mexicana (Solum); dos con la técnica francesa (Soletanche), y otras dos con la técnica italiana (Icos). Los procedimientos son bastante parecidos donde las excavaciones se realizan por sectores estabilizándose con lodo bentonítico; después, con un tubo tremie se cuelan los muros; para posteriormente excavar el núcleo y, al final, se cuele el fondo de la lumbrera.

Durante la ejecución de estas obras se presentaron innumerables problemas de carácter técnico que se mencionaran más adelante, pero el cuidado que se tuvo en los procedimientos, permitió llevar la construcción de lumbreras en arcilla a feliz término. Esto a su vez, ha servido de enorme experiencia en el conocimiento del comportamiento del subsuelo característico del Valle de México.

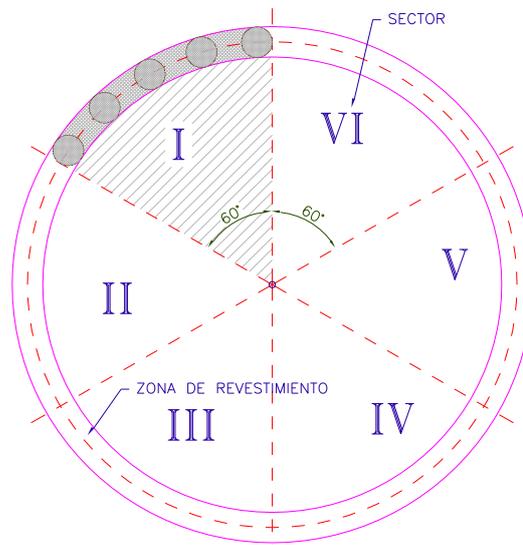
1.1.3.2.1 Técnica Solum

Esta técnica consiste principalmente en los siguientes pasos:

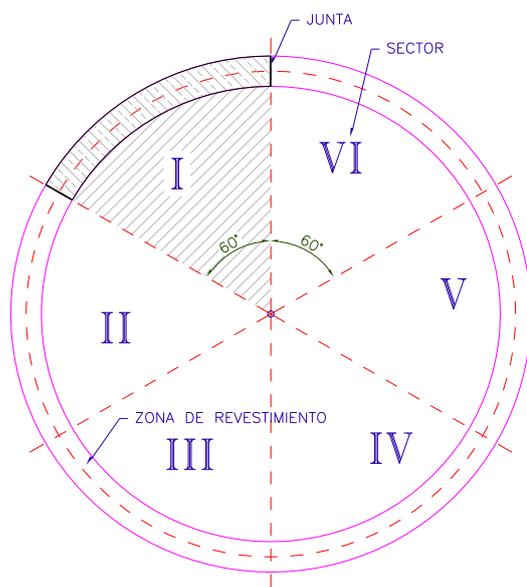
a) Después de marcar en el terreno el centro de la lumbrera y las fronteras del revestimiento, se subdivide el área en seis partes iguales, cada una con un ángulo central de 60°. Se realizan perforaciones de 0.60 m de diámetro hasta la profundidad requerida en un sector anular (figura 4), las cuales deben tener una separación entre sí de aproximadamente 0.50 m, es decir, siempre dejando una parte del terreno de este sector sin perforar.



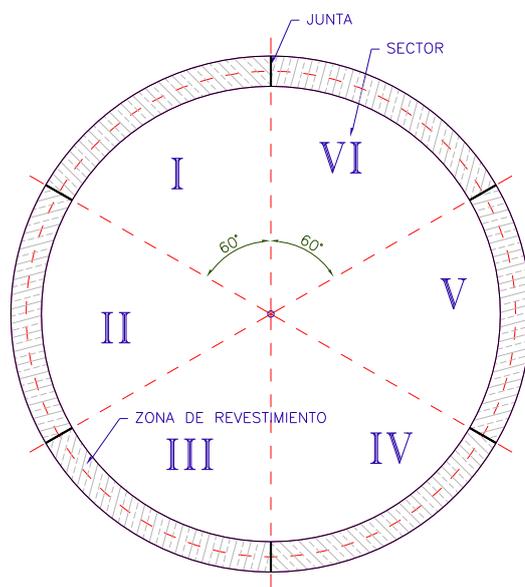
a) EN LA SUPERFICIE DE SUELO SE MARCA LA GEOMETRIA DEL MURO CILINDRICO, EL AREA SE SUBDIVIDE EN 6 SECTORES A CADA 60°, SE REALIZAN LAS PERFORACIONES DE Ø60cm ESTABILIZADAS CON LODOS BENTONITICOS, ESPACIADAS APROXIMADAMENTE EN CADA 110cm



b) EXTRACCION DEL MATERIAL REMANENTE ENTRE LAS PERFORACIONES CON ALMEJA, REEMPLAZANDOLO CON LOS LODOS BENTONITICOS



c) CONSTRUCCION DEL MURO DE CONCRETO REFORZADO EN EL PRIMER SECTOR: SE BAJA LA CANASTA DEL ACERO DE REFUERZO Y SE CUELA EL MURO CON EL TUBO TREMIE, COLOCANDO LAS JUNTAS VERTICALES EN LOS EXTREMOS LATERALES



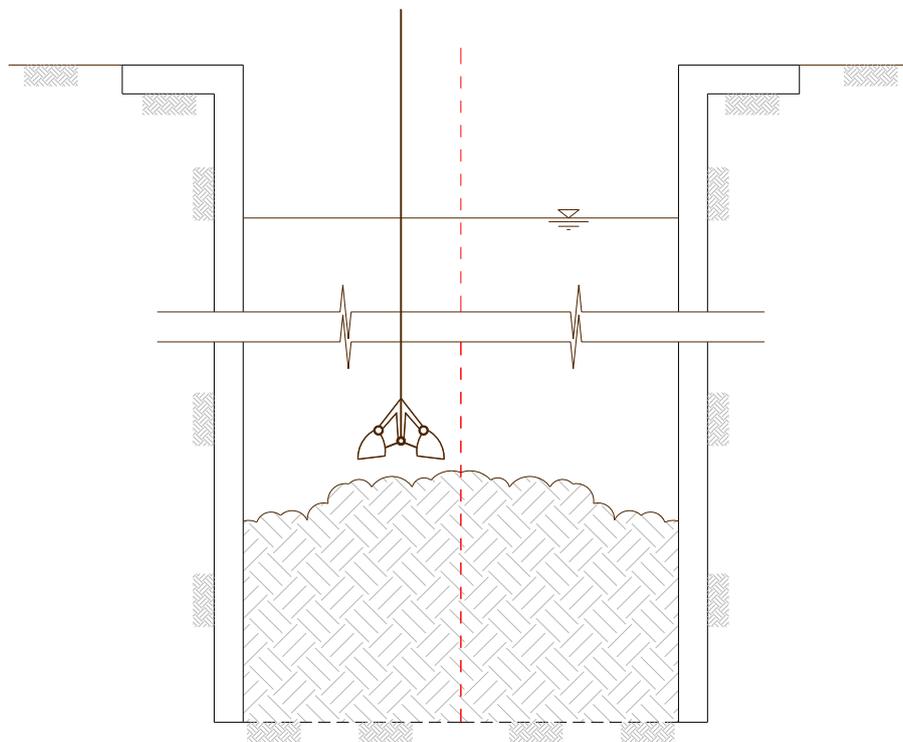
d) LAS ACTIVIDADES DE a) A c) SE REPITEN EN LOS SECTORES III Y VI, Y LUEGO EN LOS II, IV Y V

Figura 4. Técnica Solum, primeras fases.

Todo se estabiliza por medio de un lodo con bentonita, y una vez terminada la perforación de un sector anular, se procede a la extracción del material remanente por medio de una almeja, siempre reemplazando el material extraído por cantidades iguales de lodo. Después de excavar este primer sector anular se procede al colado del mismo,

el cual consiste en bajar el armado y colando concreto desde el fondo a través de un tubo tremie, desplazando el lodo de bentonita por diferencia de densidades. Se realiza este mismo procedimiento de excavación y colado para el siguiente sector anular en forma alternada, es decir, se continua con el sector No. III y después con el No. V como lo muestra la fig. 4, así sucesivamente hasta terminar con la excavación y revestimiento de las paredes de la lumbrera.

b) Se excava el núcleo con almeja hasta la profundidad donde no se presentan todavía expansiones en el fondo por la descarga del suelo, esto de acuerdo con cálculos de Mecánica de Suelos y de las observaciones provenientes de instrumentación y mediciones. Al llegar a dicho nivel se suspenden los trabajos y se reemplaza el peso del material excavado por un volumen equivalente de agua para evitar el bufamiento (ver figura 5). La excavación del núcleo se continúa extrayendo el material debajo del agua hasta llegar a la profundidad de diseño.



EXCAVACION DEL NUCLEO RESTITUYENDO EL SUELO PARCIALMENTE CON AGUA PARA EVITAR LAS EXPANSIONES EXCESIVAS

Figura 5. Excavación del núcleo.

c) Inmediatamente después de terminar la excavación se procede al colado de una primera losa de fondo de concreto en forma de tapón o plantilla dejándose fraguar lo suficiente. Después se limpia el azolve y se baja una parrilla de armado para colar una segunda losa de fondo bajo el agua. Una vez hecho esto, se extrae el agua dentro de la lumbrera bajando el personal necesario para sellar (calafatear) el tapón de fondo y evitar la entrada de agua o de material. Por último, se procede a colar el fondo definitivo de concreto reforzado y su anclaje a los muros de revestimiento de la lumbrera (figura 6).

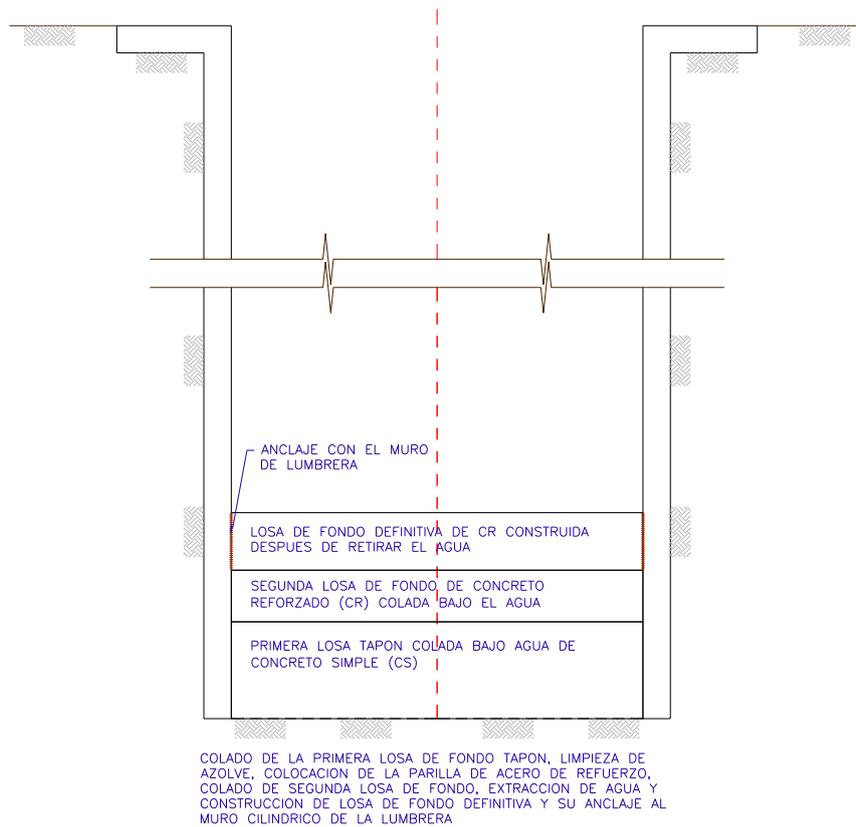


Figura 6. Construcción de losa de fondo en varias etapas.

1.1.3.2.2 Técnica Soletanche

Este procedimiento es muy similar al anterior con dos variantes principalmente:

a) La excavación del sector anular se realiza con un taladro barrenador guiado, colocado en la periferia de la lumbrera y montado sobre una vía. Esta maquinaria extrae el material por medio de una broca rotatoria y de percusión (figura 7). Al comenzar la excavación del material se inyecta, al mismo tiempo, lodo con bentonita desde el exterior. La broca tiene las funciones de licuar el material y de extraer esta mezcla de rezaga y bentonita por medio de una tubería de succión colocada en el interior de la misma, depositando dicho material en un tanque sedimentador colocado en la superficie, donde se recupera la mayor parte de la bentonita para inyectarla nuevamente. La maquinaria además de su movimiento vertical - rotatorio cuenta con un movimiento horizontal, lo que facilita la excavación de todo el sector anular al mismo tiempo (figura 8).

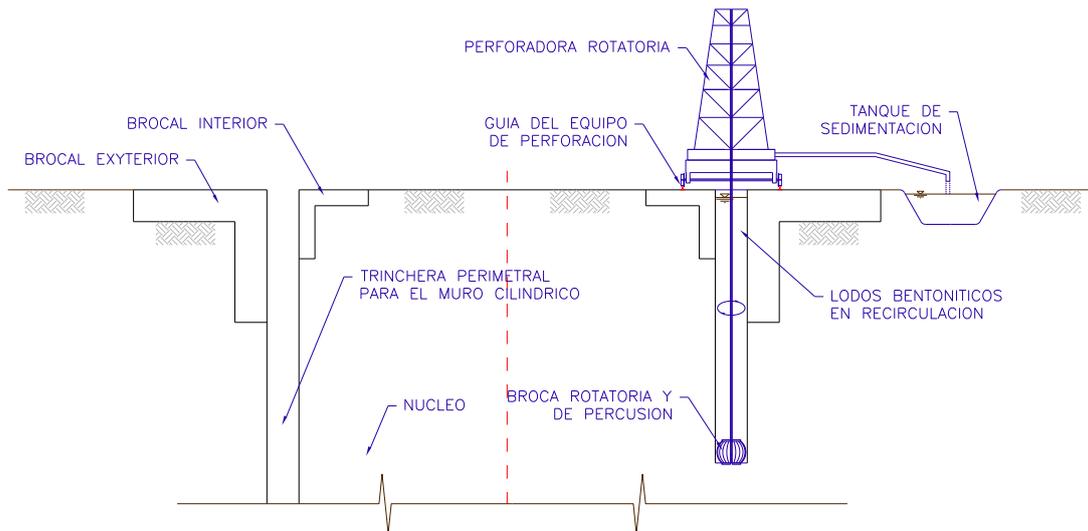


Figura 7. Excavación de la trinchera perimetral.

Una vez terminada la excavación de este sector se colocan las parrillas de armado y se procede al colado del muro de la lumbrera con concreto a través de un tubo tremie, desplazando el lodo por diferencia de densidades.

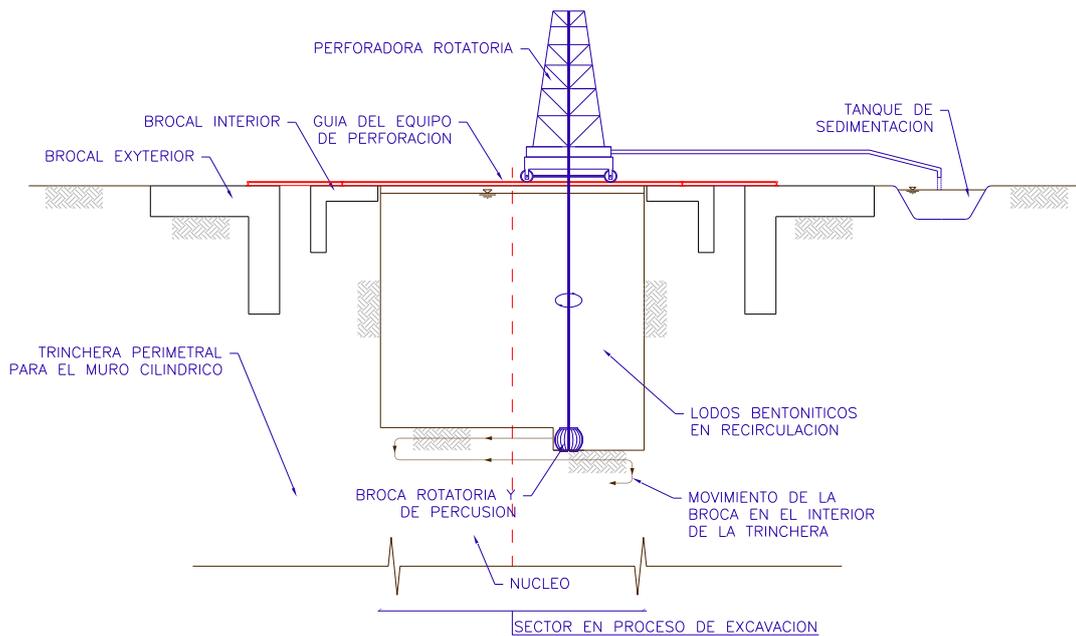


Figura 8. Excavación del sector anular.

b) El mismo taladro realiza una perforación de mayor diámetro en los extremos del sector anular (figura 9), donde se coloca una tubería que sirve de límite del sector en ambos extremos, para posteriormente realizar el colado con el procedimiento expuesto anteriormente.

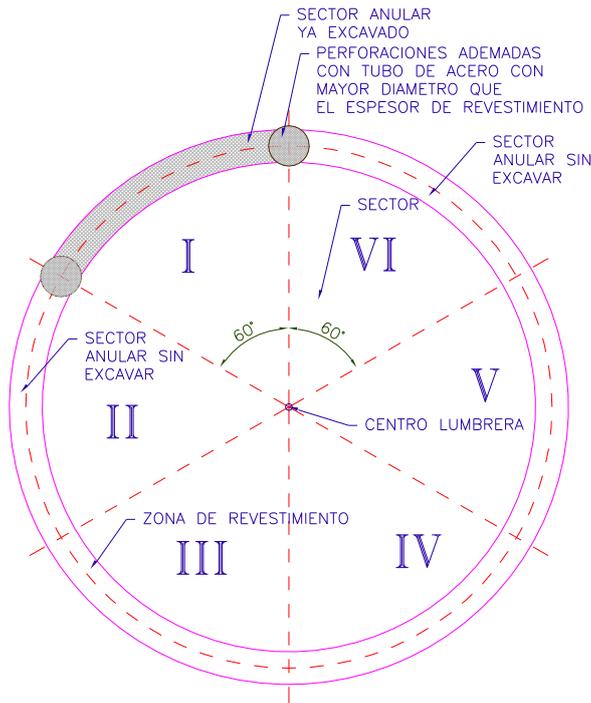


Figura 9. Tubería en los extremos del sector anular.

Una vez que el concreto ha fraguado lo suficiente, se retira la tubería y se procede a la excavación del siguiente sector, quedando la junta de colado (figura 10).

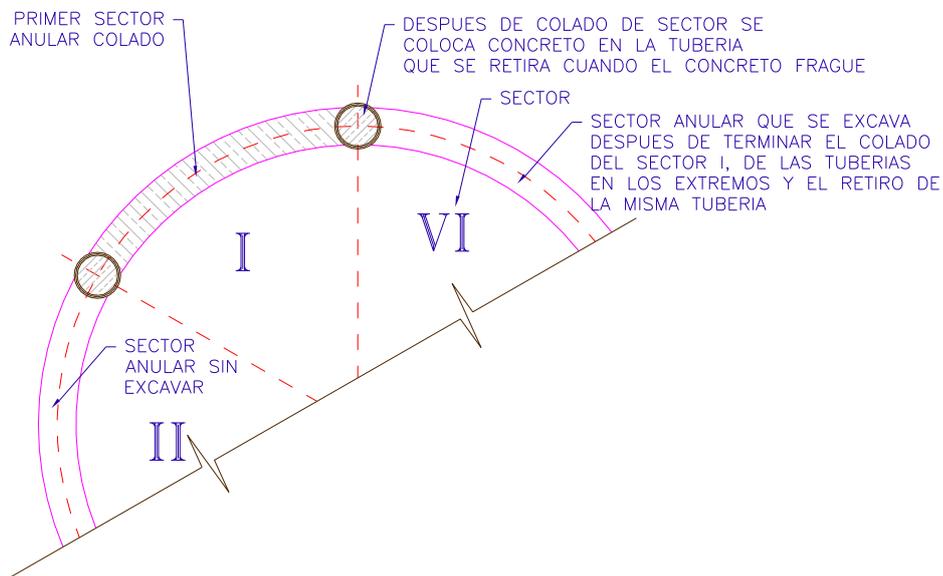


Figura 10. Paso de la construcción un sector al otro.

Después de colar todo el muro de la lumbrera, se excava el núcleo empleando una almeja, y si no se presentan expansiones importantes, no es necesario estabilizar el fondo con agua o bentonita. Si a medida que avanza la excavación del núcleo de la lumbrera se encuentran escurrimientos fuertes por las juntas, se procede a hacer un barreno para inyección de lechada (figura 11).

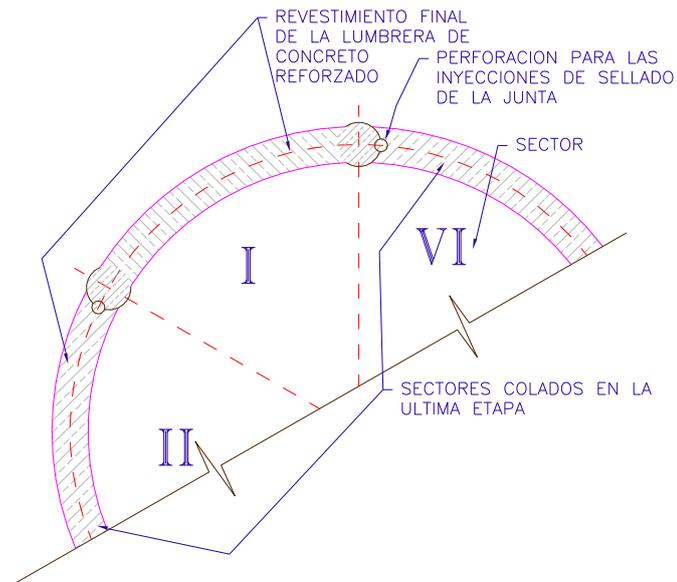


Figura 11. Las inyecciones de sello en las juntas con filtraciones.

Estas fugas se taponan perfectamente llenando los huecos que puedan existir dentro del revestimiento.

1.1.3.2.3 Técnica de Icos

El procedimiento de construcción con esta técnica es el siguiente:

a) Antes de comenzar la perforación de los muros de la lumbraera se marca sobre el terreno, un hexágono circunscribiendo a un círculo cuyo diámetro es de 9 m, en donde posteriormente irían los muros rectos del revestimiento primario hasta la profundidad deseada (40 m máximo). En la parte exterior se construye un brocal de concreto para poder colocar la máquina perforadora y la almeja (figura 12).

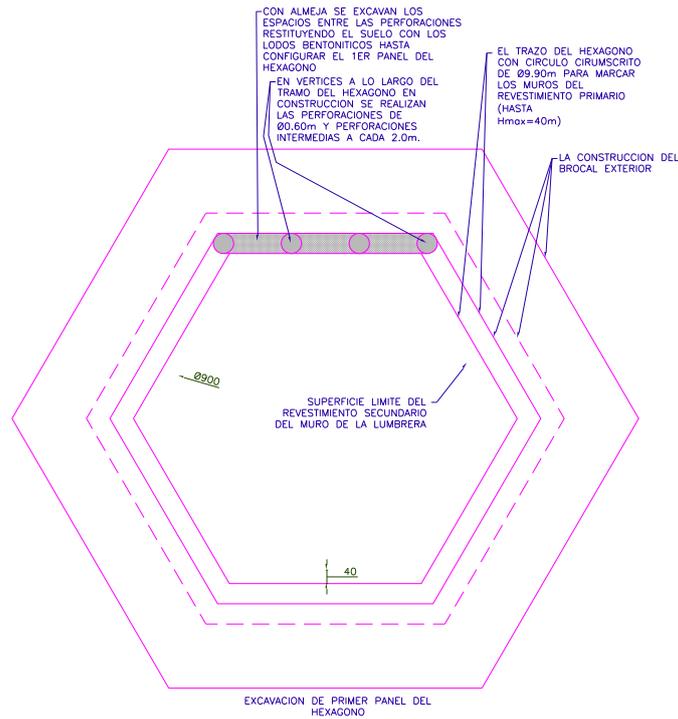


Figura 12. Preliminares: el trazado y los brocales.

b) Posteriormente se realizan perforaciones de 0.60 m de diámetro hasta la profundidad deseada, sustituyendo el material con lodo de bentonita. Las perforaciones tienen entre sí una distancia aproximada de 2 m y siempre coinciden con las esquinas de los lados del hexágono. El material que se deja entre las perforaciones es extraído por medio de una almeja, estabilizando las paredes con lodo bentonítico.

Hecho todo esto, se baja el armado en tramos de 12 m (2 lechos), uniéndolos entre sí por medio de un traslape de 1.50 m. El colado de los muros de la lumbrera se realiza con tubería tremie (figura 13), donde el concreto va desplazando el lodo por diferencia de densidades hasta finalizar con el colado de una de las paredes del revestimiento primario, continuando con las siguientes, hasta completar el hexágono.

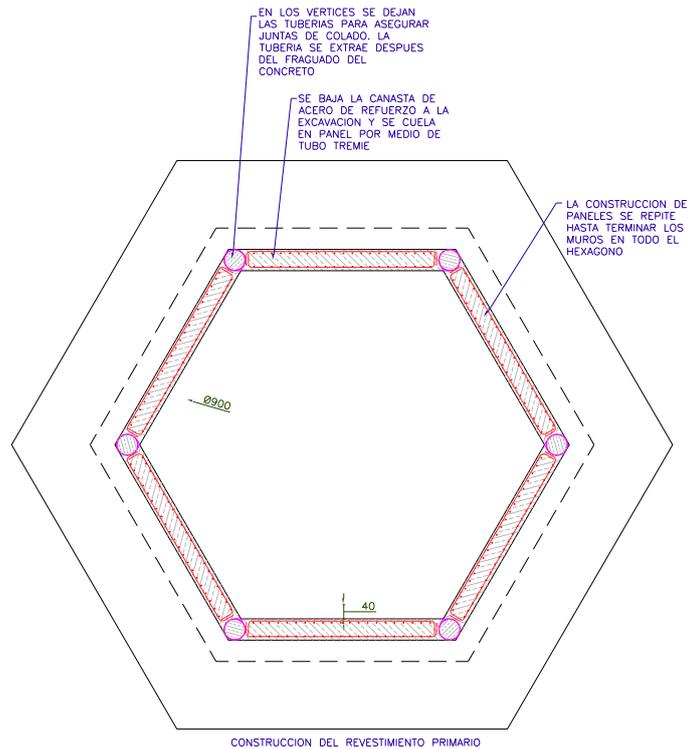


Figura 13. El colado de los muros de la lumbrera, revestimiento primario.

Para las juntas de colado se deja una tubería que impide que el concreto salga de su lugar, la cual se extrae una vez que el concreto haya fraguado (figura 14).

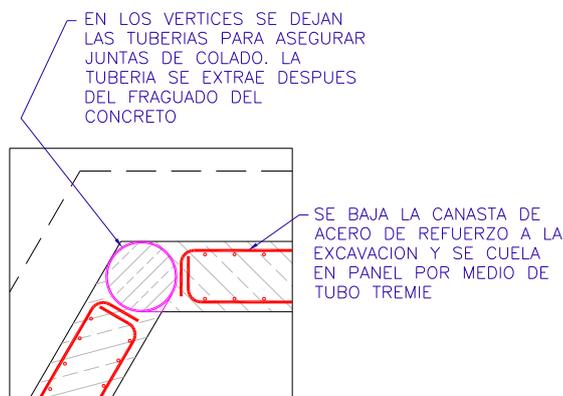


Figura 14. Tubería en las juntas de colado.

c) *Detalle de la junta de colado.* Después de colar las paredes del hexágono se excava, a base de pico y pala, una corona circular de 1.40 m de altura para hacer más rígida la parte superior de la lumbrera, colándose monolíticamente junto con el primer anillo del revestimiento secundario. La altura de este primer anillo es de aproximadamente 2 m, con un espesor mínimo de 0.40 m y su armado es integral al de la corona, anclándose a la pared del hexágono (figura 15).

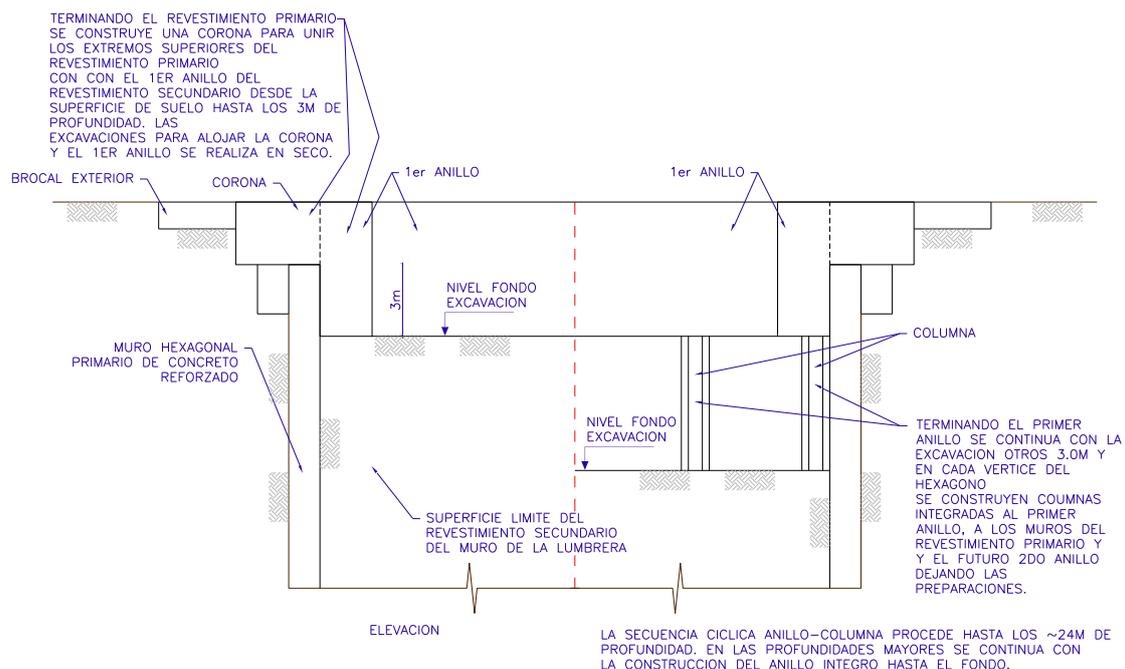


Figura 15. Corona, 1er anillo y 1era serie de columnas.

Cuando el concreto de la corona y del anillo ha fraguado, se retira la forma metálica que había sido utilizada como cimbra y se excavaba el núcleo de la lumbrera hasta una profundidad de 3 m medidos a partir del paño inferior del primer anillo. Esto se realiza con el fin de colar en las esquinas de las paredes del hexágono, unas pequeñas columnas cuyo armado se ancla al de las paredes del revestimiento y que sirve para disminuir las filtraciones, separar los anillos y proporcionar mayor rigidez a la estructura. Estas columnas presentan una altura de 3 m (figura 16).

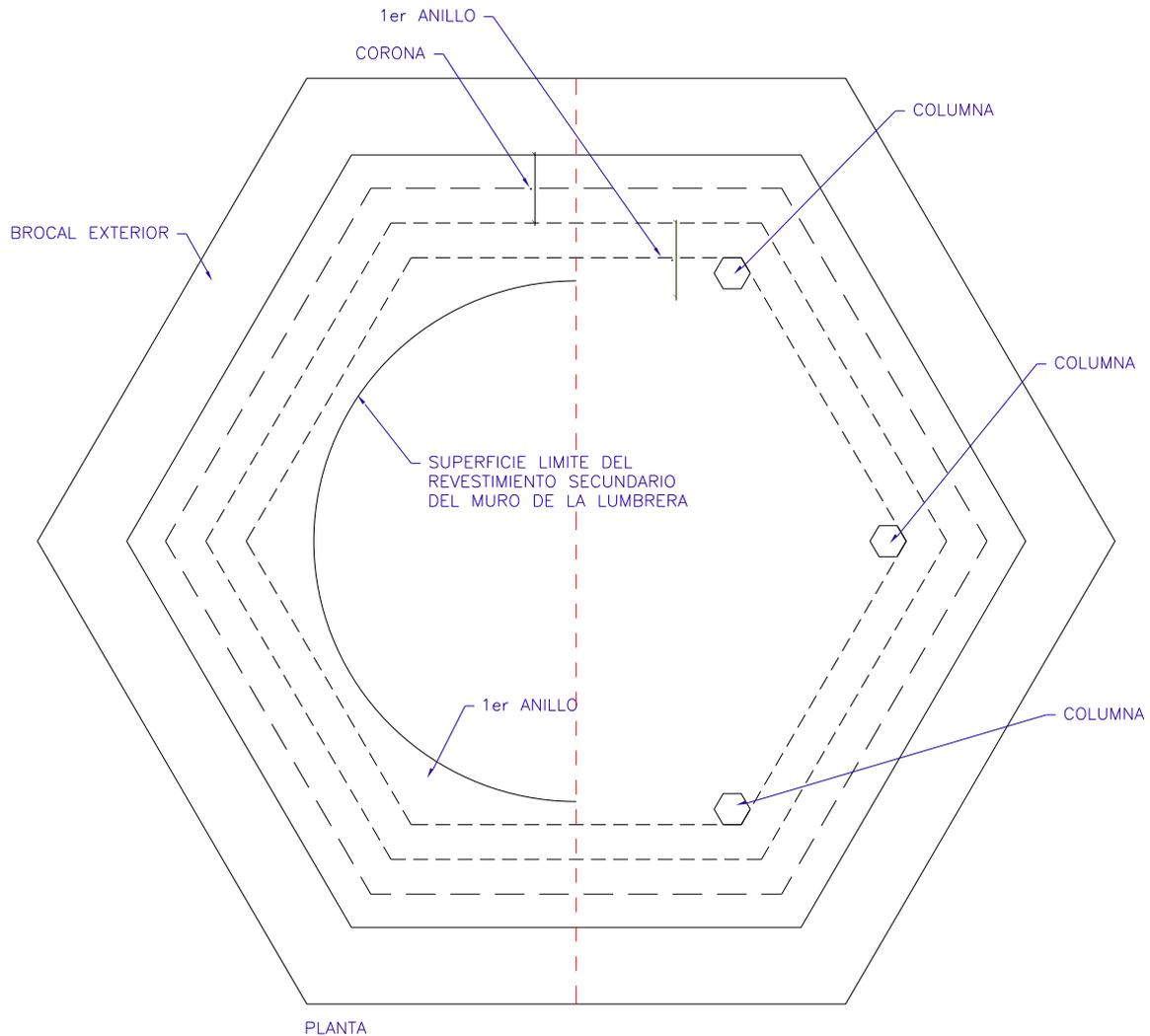
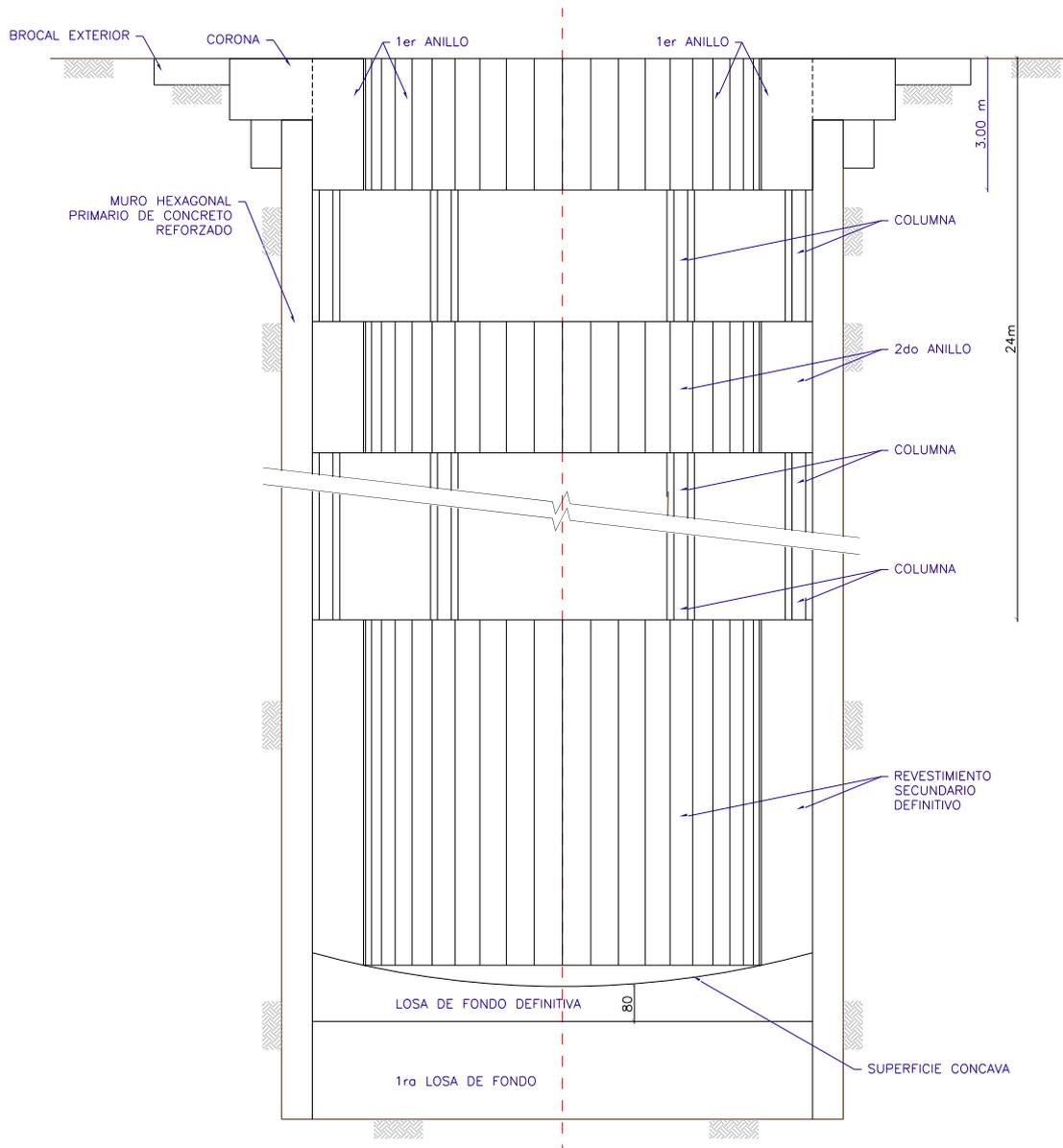


Figura 16. Columnas en planta.

d) Este mismo procedimiento se repite hasta llegar a una profundidad de 25 m. A partir de este nivel, el revestimiento es continuo, es decir, ya no se colaron columnas en las esquinas sino que los anillos se continuaron hasta llegar al fondo. En ninguna de las dos lumbreras construidas con esta técnica se presentaron bufamientos importantes del fondo mientras se construían. Después de bombear el agua que queda dentro de la lumbrera; se procede a colar el fondo, el cual se optó por hacerlo cóncavo para tener mejores condiciones de resistir las presiones. El armado del revestimiento secundario se ancló por medio de soldadura, teniendo un espesor mínimo de 0.80 m (figura 17).



LA SECUENCIA CICLICA ANILLO-COLUMNA PROCEDE HASTA LOS ~24M DE PROFUNDIDAD. EN LAS PROFUNDIDADES MAYORES SE PROCEDE CON LA CONSTRUCCION DEL ANILLO CONTINUO HASTA EL FONDO.

LLEGANDO AL FONDO DE LA LUMBRERA SE CONSTRUYE LA PRIMERA LOSA DE FONDO Y DESPUES LA LOSA DE FONDO DEFINITIVA CON LA FORMA CONCAVA PARA MINIMIZAR A LOS ESFUERZOS POR TENSION Y REQUERIR LOS MINIMOS ESPESORES Y CANTIDADES DE ACERO DE REFUERZO

Figura 17. Secuencia del procedimiento constructivo del revestimiento secundario y de la losa de fondo.

1.1.3.2.4 Técnica Ipsa

Esta técnica fue usada en una lumbrera que se encontraba localizada en sus primeros 23 m de profundidad en arcillas características del Valle de México y en la profundidad restante, en una roca basáltica muy fracturada. La geometría de esta lumbrera fue muy particular, por ser la que recibía por superficie el agua del gran canal y por la parte inferior daba salida al túnel del interceptor del Oriente.

El procedimiento constructivo empleado consiste en lo siguiente:

a) Localizado el eje de la lumbrera se procede a marcar en el campo un polígono de 16 lados iguales (figura 18.a). La longitud de cada uno de los lados del polígono es la abertura máxima de la almeja, con la que se excavan los muros de la lumbrera sustituyendo el material por lodo bentonítico. Al igual que en las anteriores técnicas, se excava a mano el brocal (figura 18.b), el cual sirve de guía para la herramienta de excavación y evitar cualquier desprendimiento de sus paredes.

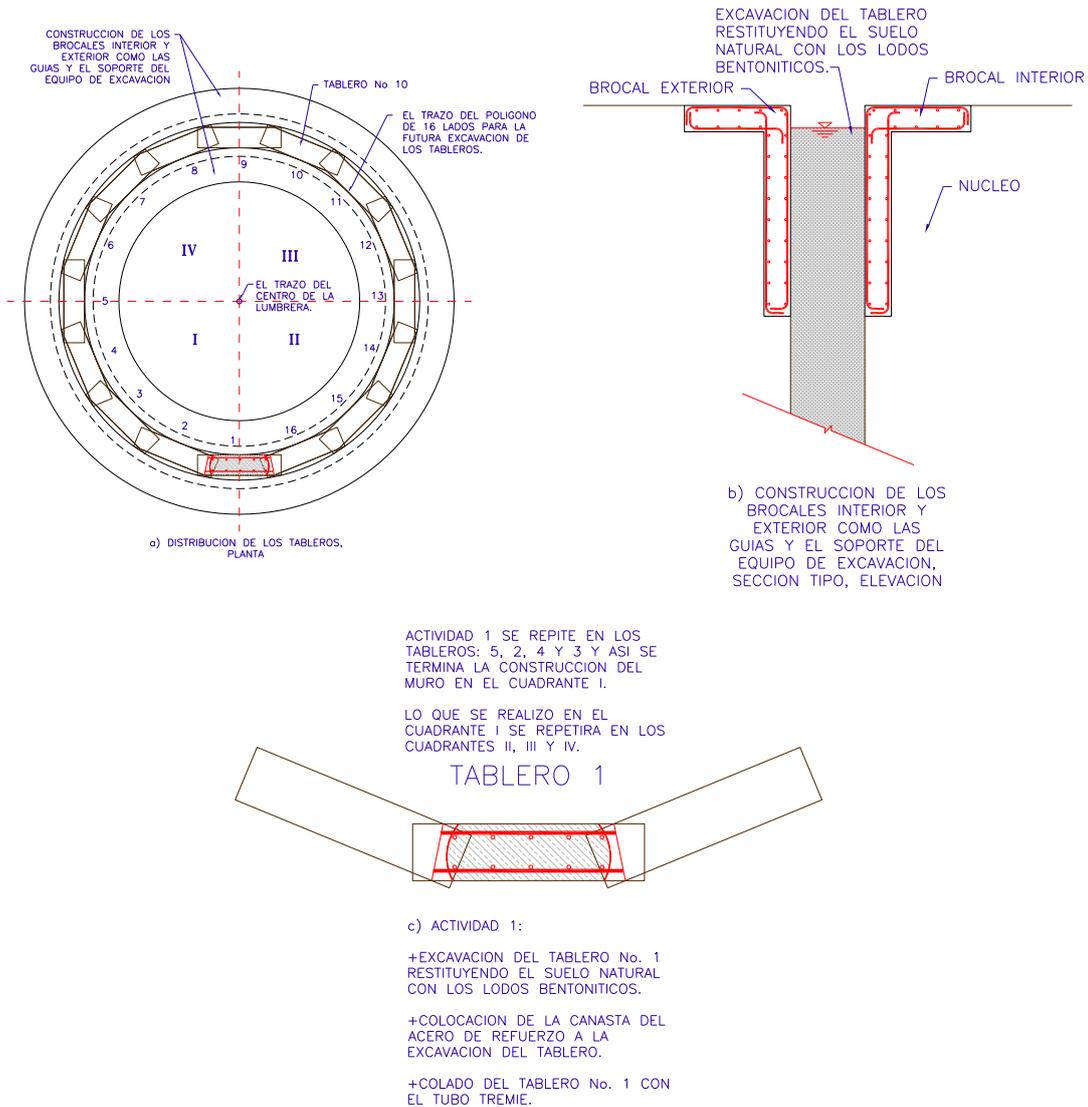


Figura 18. Secuencia de actividades de construcción de la lumbrera.

b) El procedimiento de excavación de los tableros de la lumbrera fue el siguiente:

- Excavación del tablero No. 1.
- Colocación del armado de acero de refuerzo de la columna A (figura 18.c).
- Colado bajo lodo bentonítico, un tubo tremie de la columna A.
- Excavación del tablero No. 5.
- Colocación del armado de acero de refuerzo de la columna B.

- Excavación del tablero No. 2.
- Excavación del tablero No. 4.
- Excavación del tablero No. 3.
- Colado bajo lodo bentonítico de los tableros 2, 3 y 4.

Esta misma secuencia se aplicó para los tres cuadrantes restantes.

c) Todos los muros de la lumbrera fueron colados hasta la profundidad 24 m dejando las preparaciones necesarias en los tableros correspondientes para recibir la conexión de un cajón superficial. Colados los muros de la lumbrera se procede a excavar el núcleo hasta los 23 m mediante una almeja, posteriormente se cambió el procedimiento de excavación, usando explosivos hasta llegar a la profundidad necesaria.

1.1.3.2.5 Lumbreras flotadas con el método Cravioto

En 1969, los ingenieros Jorge Cravioto y Abel Villareal patentaron el método para construir lumbreras por flotación, el cual ha permitido construir, con seguridad y eficiencia, más de 20 lumbreras en las arcillas blandas de la ciudad de México. Las dimensiones máximas han sido de 19 metros, en diámetro, y 30 metros, en profundidad; y los lapsos constructivos han variado entre 4 y 6 meses. Las distintas etapas del procedimiento constructivo comprenden lo siguiente:

a) Construcción de brocales:

Se construyen dos brocales de concreto reforzado de forma circular y concéntricos (figura 19), los que conforman un polígono de 10, 12 o más lados, que circunscribe al diámetro de la lumbrera más una cierta holgura, para dar la guía y garantizar la verticalidad de la excavación de los tableros de la zanja anular. En los vértices del polígono se realizan perforaciones de 45 cm de diámetro con maquina y hasta la profundidad de desplante de la lumbrera manteniéndose llenas con lodo bentonítico. En la actualidad la lumbrera se construye circular.

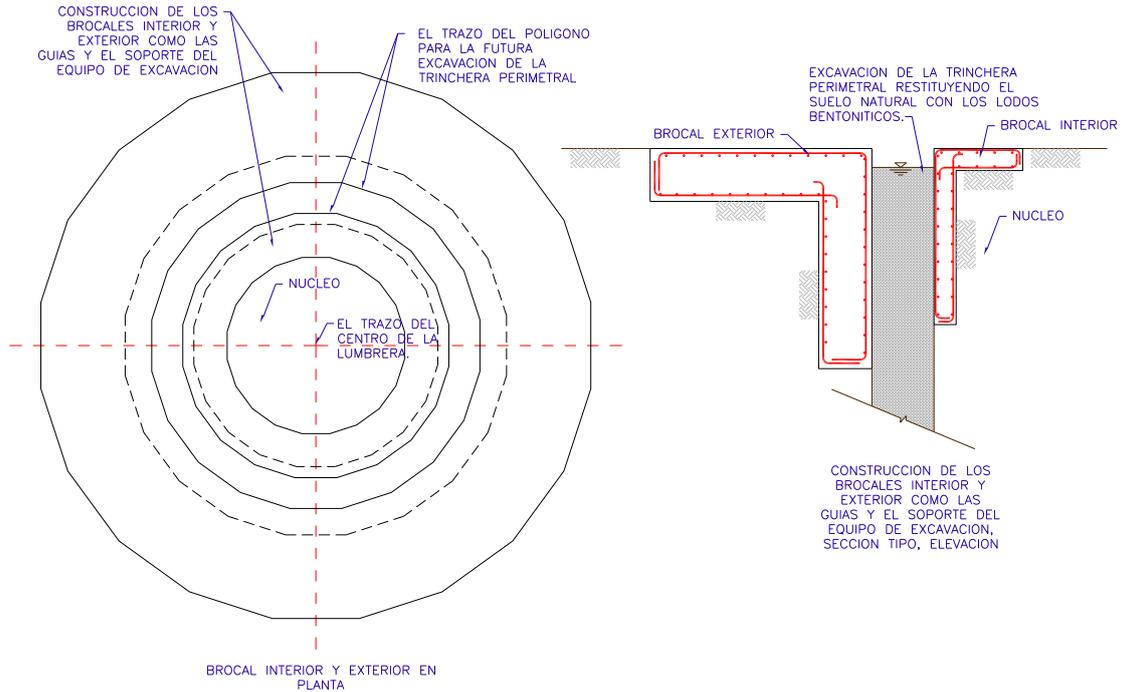


Figura 19. Trazo de la lumbrera y de los brocales.

b) Excavación de la zanja anular:

Los tableros de la zanja anular se distribuyen uniformemente a fin de poder excavarlos alternadamente con un equipo de almeja guiada (figura 20), hasta alcanzar la profundidad de proyecto. Durante la etapa de extracción de suelo en la zanja perimetral, el volumen de material desalojado se sustituye constantemente por un lodo bentonítico de ciertas características especificadas, manteniendo siempre su nivel por lo menos a un metro abajo del brocal para garantizar la estabilidad de las paredes de la excavación.

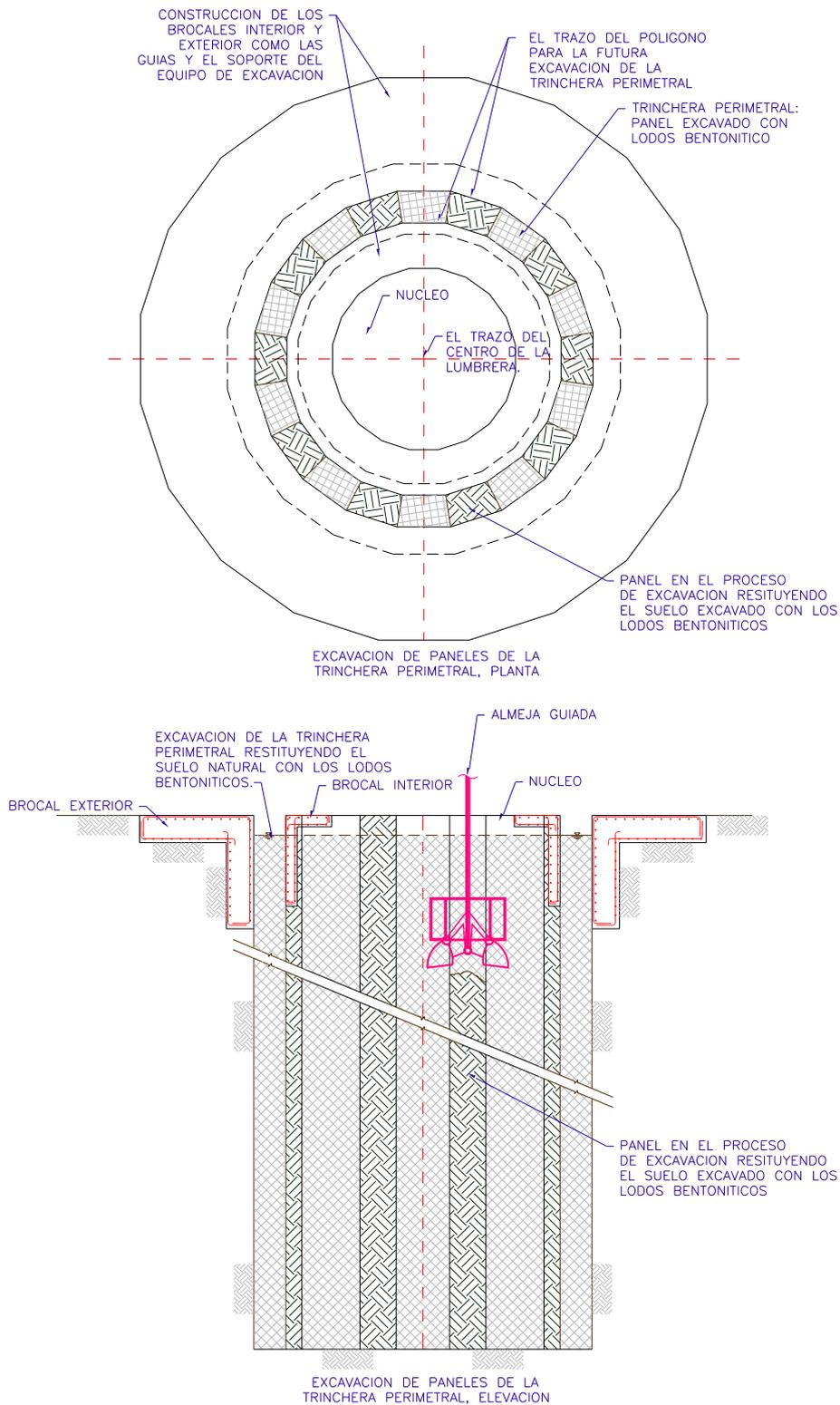


Figura 20. Excavación de la zanja anular.

c) Excavación del núcleo.

Terminada la zanja perimetral, se demuele el brocal interior y se procede al retiro del núcleo central de suelo con almeja. La estabilidad de la excavación se logra manteniéndola siempre llena con bentonita recirculada y sometida, continuamente, a un control de densidad muy riguroso (figura 21).

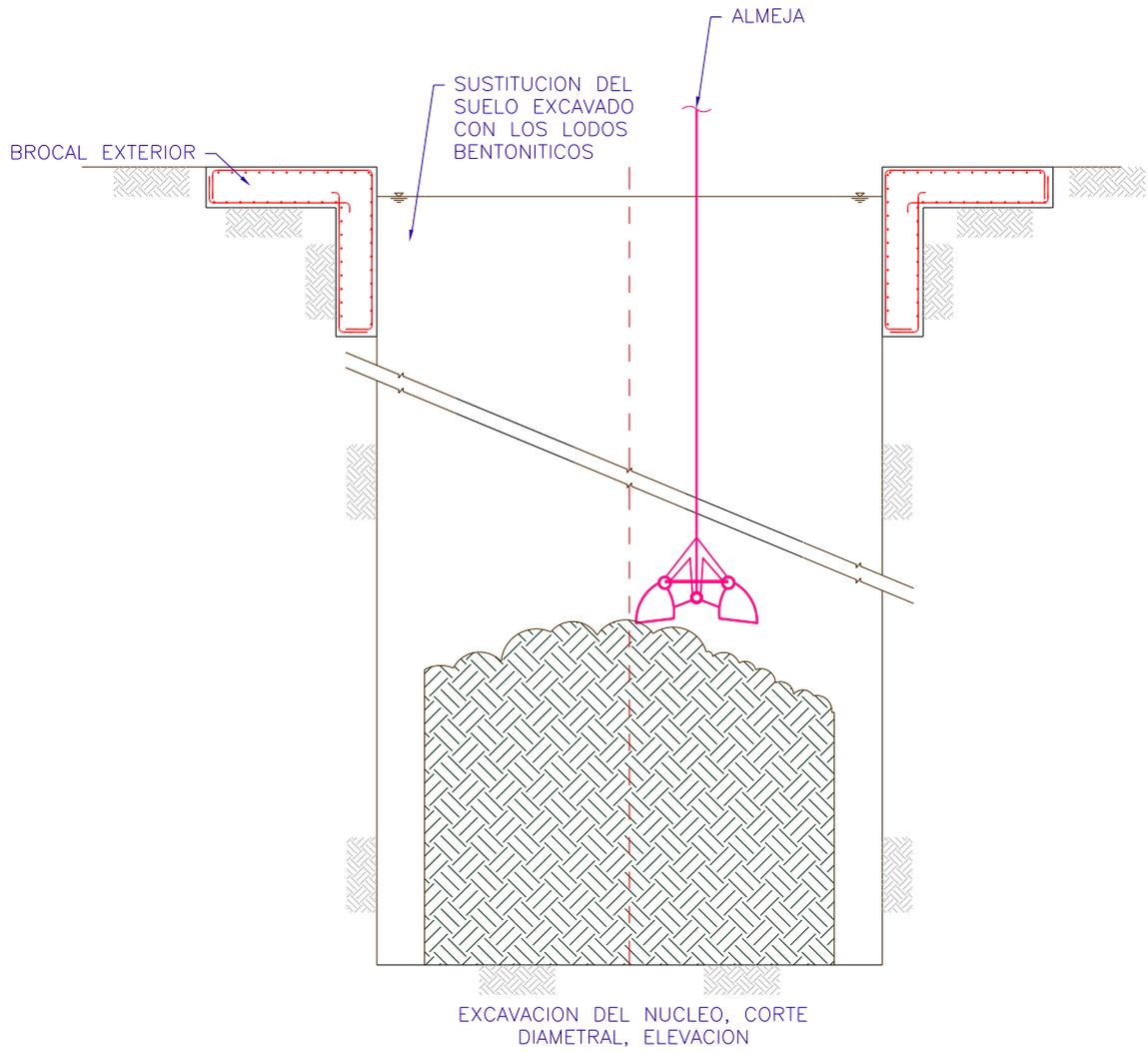


Figura 21. Excavación del núcleo.

Se habilita y construye un tanque metálico reforzado internamente y descubierto en su cara inferior, con un diámetro ligeramente mayor al exterior de la propia lumbrera (figura 22) que presenta además una serie de tuberías colocadas al centro del tanque y cuatro líneas distribuidas en su perímetro, con el fin de manejar los respectivos procesos de inmersión a través de la inclusión y desalajo del aire en el interior, lo que motiva que sea hermético en todas sus uniones soldadas.

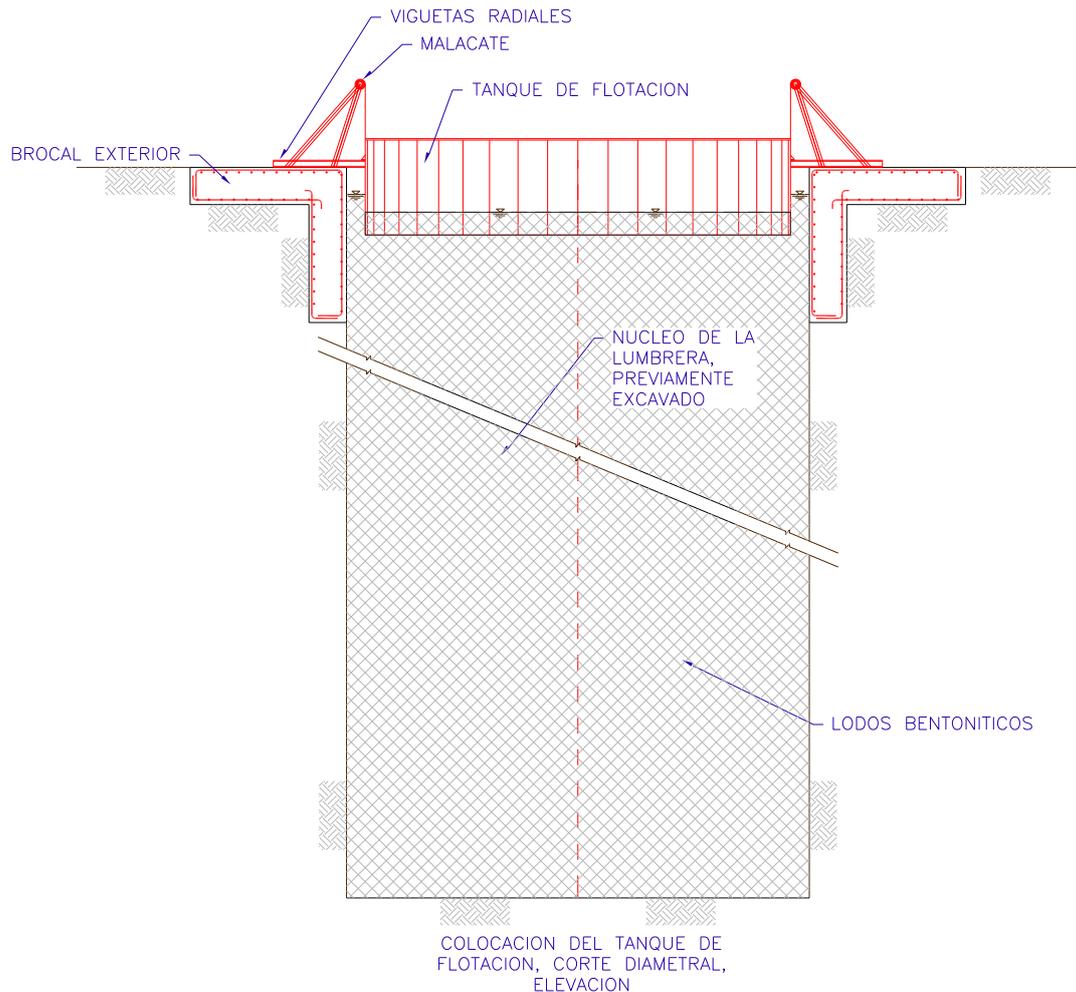


Figura 22. Tanque de flotación.

d) Construcción e inmersión de la lumbreira.

A continuación, se coloca el tanque metálico sobre la superficie del lodo, para que flote en posición invertida, sosteniéndolo del brocal exterior mediante viguetas metálicas y cuatro malacates con poleas de carga, para que de esta manera se convierta en un área de trabajo sobre la cual se coloca el acero de refuerzo para la losa de fondo y parte de los muros de la lumbreira, procediendo posteriormente a cimbrar perimetralmente el tramo respectivo con una altura próxima a los 2.0 m y a realizar el colado correspondiente para su construcción consecutiva.

Terminada la primera etapa de colado, se inyecta aire al interior del tanque metálico para propiciar su flotación y retirar así el sistema de viguetas radiales de sostenimiento, quedando listo para iniciar la primera inmersión respectiva, provocada al desalojar de una forma controlada el aire atrapado en el interior del tanque.

El descenso de la estructura tanque-lumbreira es guiado a través de los cuatro malacates que permiten su ajuste en caso necesario, sumergiéndose hasta que la sección del muro esté al nivel del brocal para detenerlo nuevamente con las viguetas radiales,

prosiguiendo posteriormente con el siguiente tramo de armado, cimbrado, colado, y descenso respectivo. Este proceso se repite cuantas veces sea necesario hasta colocar el tanque sobre el fondo de la excavación (figura 23), procediendo a construir las traves de liga entre el muro de la lumbrera y el brocal exterior.

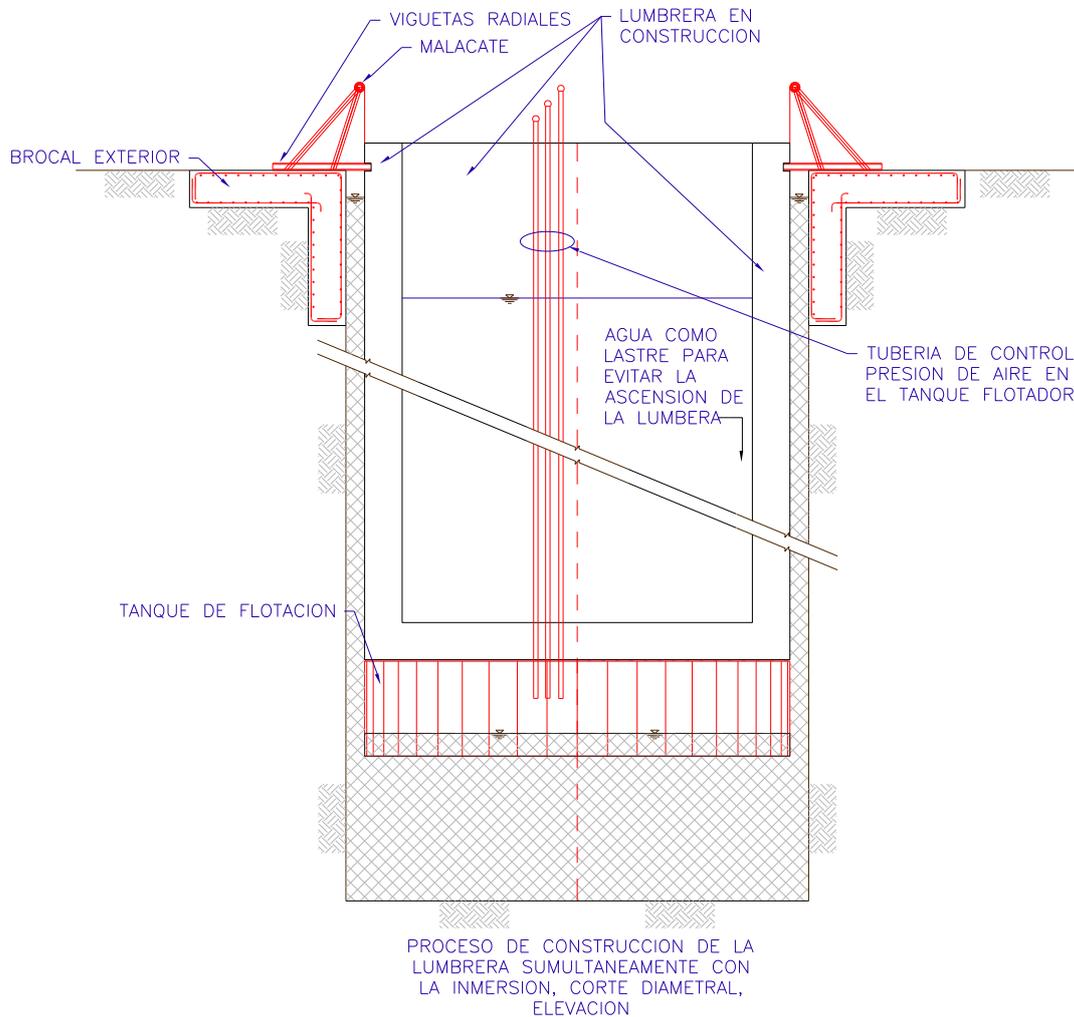


Figura 23. Construcción del la lumbrera a base de sumersión del tanque flotador.

Cabe hacer notar que durante el ciclo de colados e inmersiones, el empuje de flotación tiende a ser mayor que el peso del conjunto ya construido, por lo cual llega a ser necesario colocar un lastre adicional en el interior de la lumbrera con un volumen de agua o lodo, a fin de ayudar a las inmersiones de la estructura (figura 23).

e) Relleno de la zanja anular

A través de las tuberías instaladas en el tanque de flotación y prolongadas hasta la parte superior de la lumbrera, se rellena con mortero el interior del tanque de flotación, asimismo mediante diversas líneas de tuberías tremie instaladas perimetralmente, se rellena el espacio anular entre el muro de la lumbrera y la pared de la excavación (figura 24), a fin de proporcionar un confinamiento adecuado y evitar la flotación de la estructura al momento de desalojar el lastre.

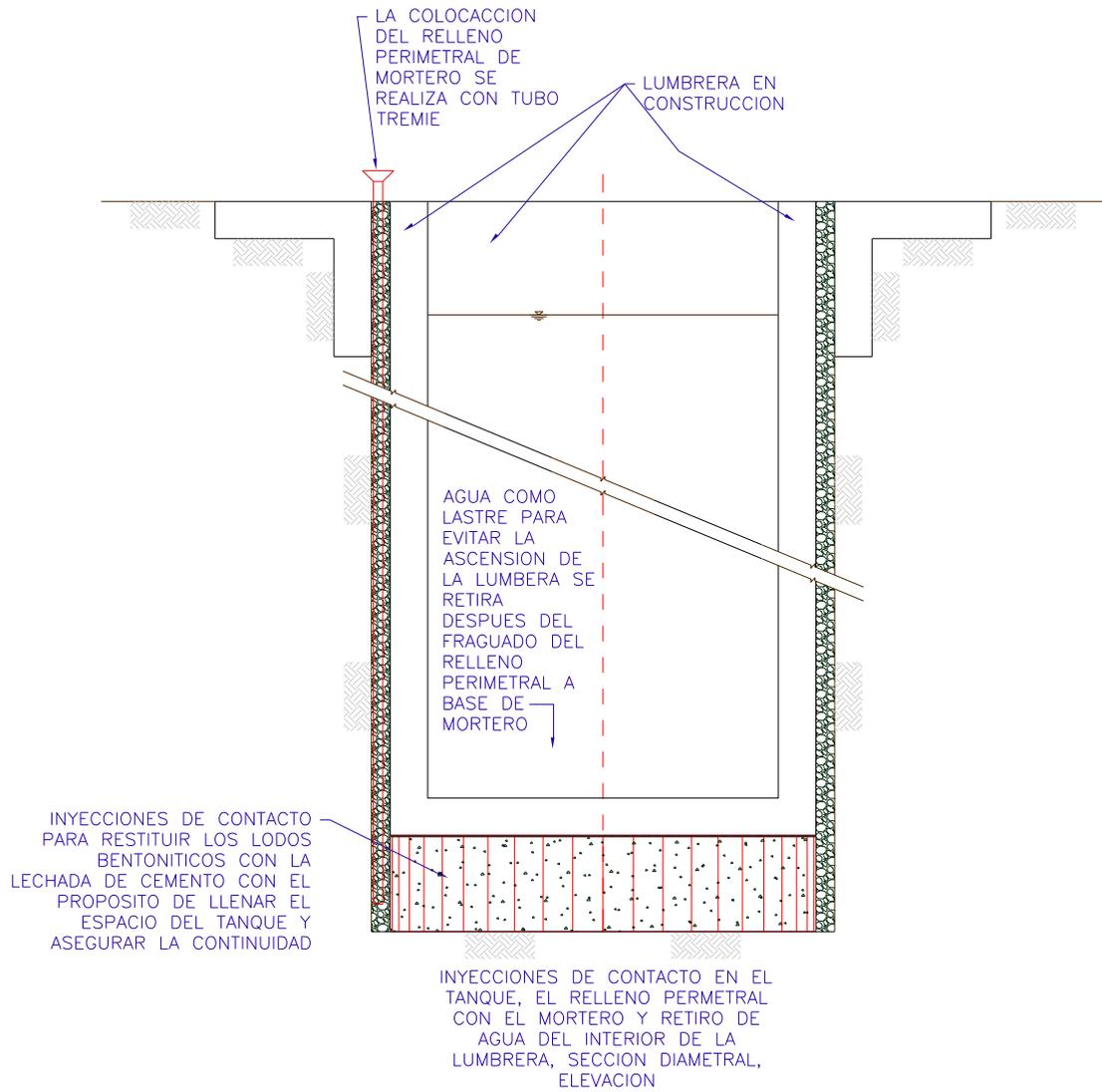


Figura 24. Inyecciones de contacto y relleno perimetral.

Después del fraguado del mortero del relleno perimetral se retira el agua del interior de la lumbra y se construye la losa de fondo definitiva (figura 25).

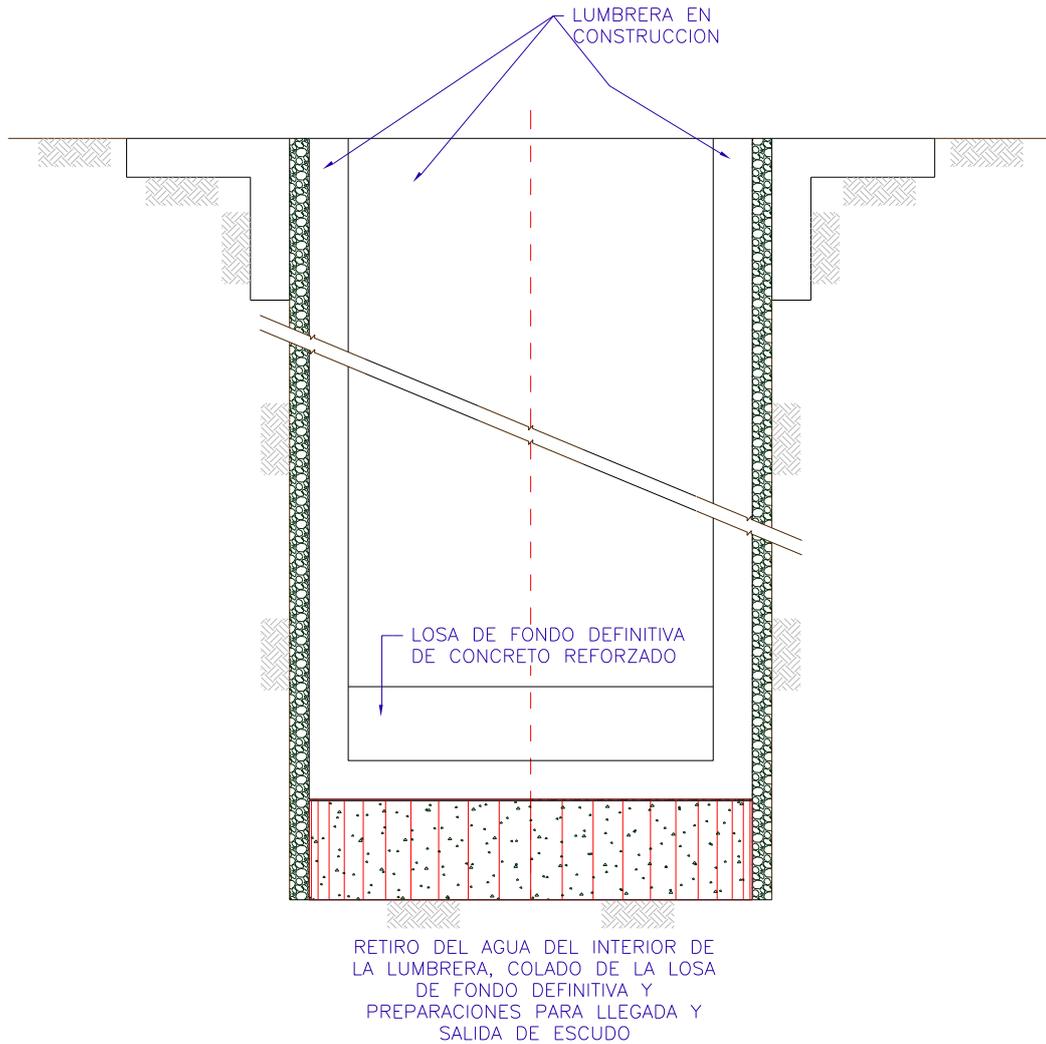


Figura 25. Losa de fondo definitiva.

f) Sustitución del suelo.

A continuación en la zona de salida y/o llegada del túnel a la lumbraera (figura 26), se sustituye el suelo natural por un mortero de baja resistencia y con mejores características mecánicas, de tal forma que el escudo excavador de frente presurizado pueda atravesarlo sin dificultad, a la vez de permitir la demolición de la pared de la lumbraera sin peligro de una falla de extrusión del material expuesto, al inicio de la excavación del túnel.

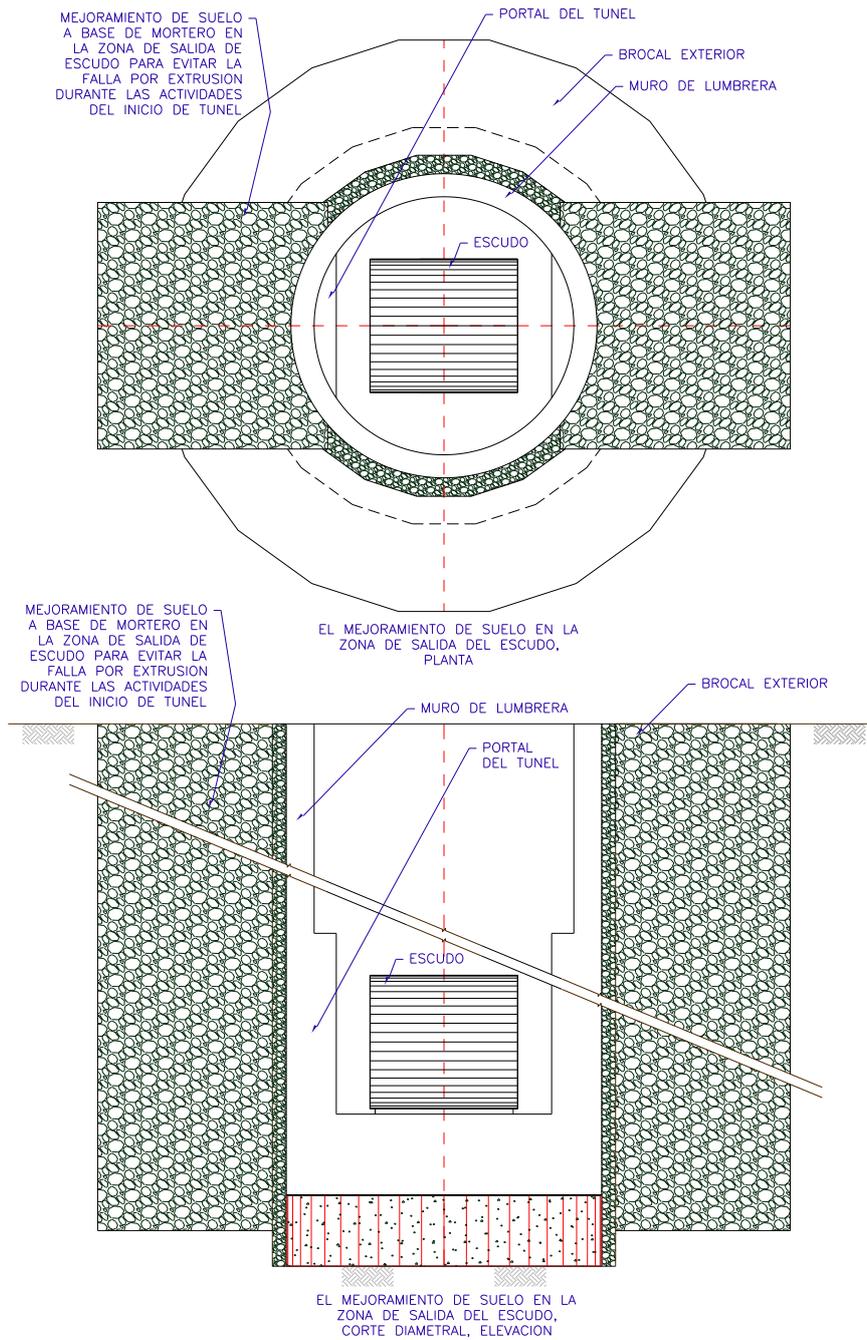


Figura 26. Mejoramiento de suelo en la entrada y salida de escudo.

1.2 Casos de falla en las lumbreras 6 y 7 del Interceptor Oriente

1.2.1 Descripción breve de las fallas

En la construcción de lumbreras (referencia iii) en suelos blandos, las fallas ocurridas son de dos tipos: por extrusión (flujo plástico) del suelo a través de las juntas entre los muros de ademe, o por falla del suelo en el fondo de la excavación.

Las fallas que a continuación se reseñan, ocurrieron en la Lumbrera 6 y en la Lumbrera 7 del Interceptor Oriente (figura 3). En ambos casos hubo extrusión de la arcilla por una de las juntas entre los muros, durante la excavación del núcleo de la lumbrera. Las condiciones estratigráficas del subsuelo eran muy similares y típicas de la Zona del Lago; la geometría y dimensiones de las lumbreras también eran similares, y la profundidad a la que se presentaron las fallas fue casi igual. (figuras 27 y 28).

1.2.2 Lumbrera 6 del Interceptor Oriente

La Lumbrera 6 se proyectó como una estructura cilíndrica de 9 m de diámetro interior, 32.5 m de profundidad y muros de 0.6 m de espesor, de concreto armado, colado por sextantes, en trincheras previamente excavadas y estabilizadas con lodo bentonítico.

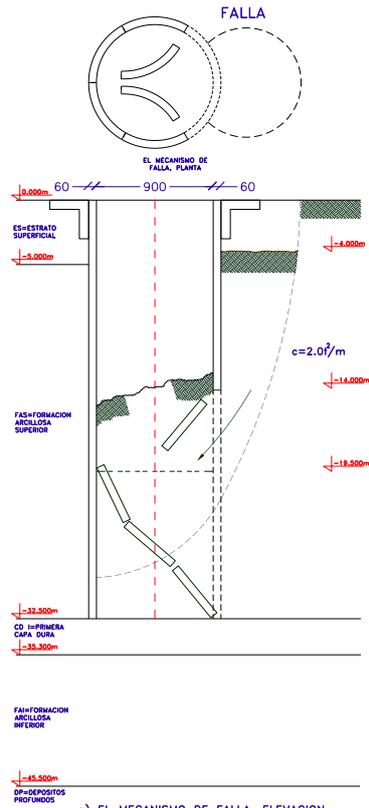
El subsuelo tuvo el siguiente perfil: Estrato Superficial, hasta los 5.0 m de profundidad; Formación Arcillosa Superior, desde 5.0 hasta 32.5 m; Capa Dura, desde 32.5 hasta 35.3 m, y la Formación Arcillosa Inferior, desde 35.3 hasta 45.5 m. (figura 27)

La lumbrera llegaba a la Capa Dura. La cohesión de la arcilla fue de 2.0 t/m^2 , en promedio, y su contenido de agua de 392% (promedio), con un máximo de 597%. El peso volumétrico promedio del suelo fue de 1.28 t/m^3 .

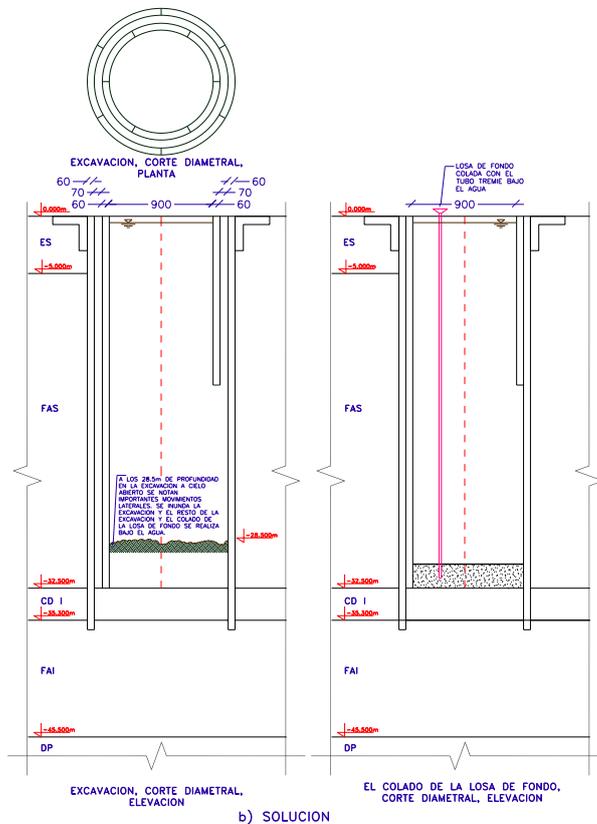
El método constructivo corresponde a la técnica mexicana (Solum).

La falla, catastrófica, se presentó cuando se estaba excavando el núcleo, a los 19.5m de profundidad. A través de una junta, y provocando la rotura (desde los 14.0 m de profundidad) de los muros adyacentes, penetraron a la lumbrera 250 m^3 de arcilla. El nivel del suelo en el interior subió hasta los 15 m de profundidad.

Simultáneamente, en la superficie se formó una depresión junto a la estructura, con un diámetro similar al de la lumbrera y un desplazamiento vertical de 4 m. (figura 27).



a) EL MECANISMO DE FALLA, ELEVACION



b) SOLUCION

Figura 27. Lumbrera 6, Interceptor Oriente.

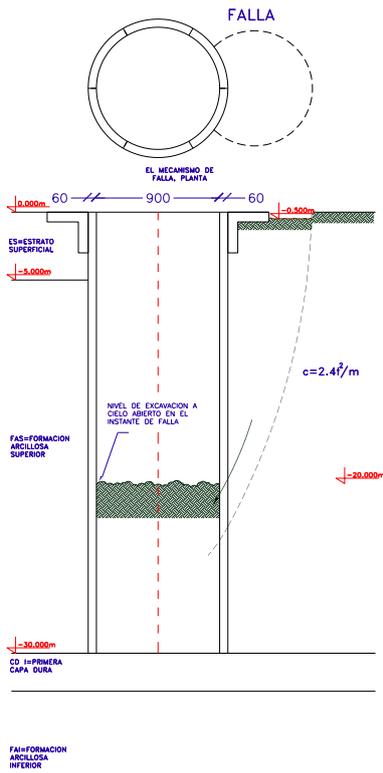
1.2.3 Lumbreira 7 del Interceptor Oriente

En la Lumbreira 7 (también cilíndrica, de 9 m de diámetro, con muros de 0.6 m de espesor; pero de 30 m de profundidad), se aplicó el mismo procedimiento constructivo.

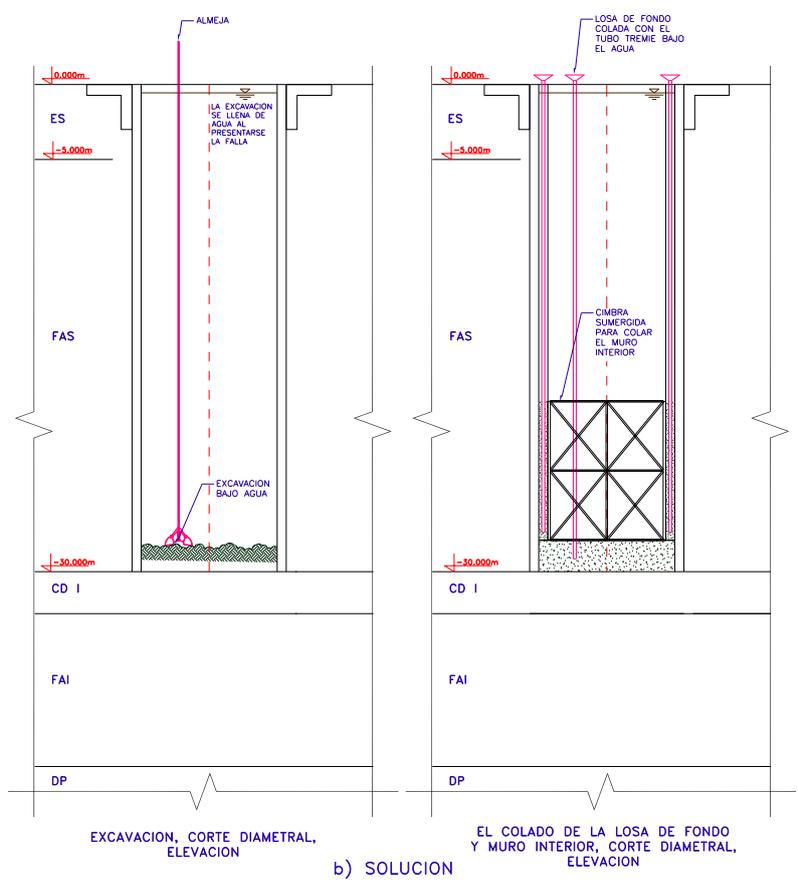
El perfil del subsuelo se muestra en la figura 27.

La lumbreira apenas llegaba a la parte superior de la Capa Dura. La arcilla tenía una cohesión de 2.4 t/m^2 , en promedio, y un contenido de agua de 309% (promedio), con máximo de 567%. El peso volumétrico promedio del suelo era de 1.28 t/m^3 .

La falla ocurrió cuando la excavación del núcleo llegó a los 20 m de profundidad. A través de una de las juntas, penetraron a la lumbreira 30 m^3 de arcilla. La depresión superficial provocada fue de 0.5 m. (figura 28)



o) EL MECANISMO DE FALLA, ELEVACION



b) SOLUCION

Figura 28. Lumbrera 7, Interceptor Oriente.

1.2.4 La rehabilitación de las Lumbreras 6 y 7

Después, se construyó una nueva lumbrera, concéntrica, alrededor de la fallada. La separación anular entre ambas fue de 0.7 m. Se utilizó, básicamente, el mismo método constructivo (excavando y colando los muros por sextantes, y con espesor de 0.6 m), pero las nuevas juntas se ubicaron al centro de los anteriores muros y, para formarlas, se utilizaron tubos de 0.6 m de diámetro, logrando uniones machihembradas con superficies cilíndricas de sección semicircular. Estas uniones eran lavadas con agua a presión y retacadas con mortero, a todo lo largo, por el conducto para inyección previsto, desde el colado, al centro de la junta.

Además, la excavación y el colado de los muros se hicieron hasta alcanzar una profundidad de 42 m, penetrando la Capa Dura y llegando a la Formación Arcillosa Inferior. (figura 27. b)

Con inclinómetros y mediante nivelaciones se observó el comportamiento del terreno circundante, mientras se rehabilitaba la obra.

Cuando se estaba excavando el núcleo a la profundidad de 28.5 metros, los inclinómetros detectaron un movimiento indicativo de una nueva falla. Fue necesario inundar la lumbrera para prevenir un problema mayor. La excavación final, entre los 28.5 y los 32.5 m, y el colado de la losa de concreto armado del fondo, se realizaron bajo el agua. (figura 27. b)

Al presentarse la falla en la Lumbrera 7, se procedió a inundarla. Con almeja, se reanudó la excavación hasta alcanzar la profundidad proyectada. Luego, se sumergió una cimbra de madera para colar un muro interior con una losa en el fondo (figura 28. b)

1.3 Objetivos

El propósito de esta tesis es presentar el procedimiento de construcción de las lumbreras con anillos prefabricados indicando todas las fases de su construcción, desde el trazo de los brocales hasta el instante de la recepción o inicio de escudo o de tubo hincado, indicando el soporte analítico relacionado con los problemas geotécnicos relacionados con la estabilidad y las deformaciones o desplazamientos. Algunos de estas situaciones críticas de de la construcción son:

- La falla de la trinchera perimetral.
- La falla de fondo.
- La evolución de los desplazamientos.
- Comportamiento a largo plazo tomando en cuenta el hundimiento regional.
- Respuesta sísmica de la lumbrera.

1.4 Alcances

En el capítulo uno se presentan los antecedentes donde se describen las condiciones geotécnicas, breve historia de las obras hidráulicas, los anteriores procedimientos de construcción de lumbreras, así como los casos y tipos de fallas en las lumbreras en la Zona de Lago del Valle de México.

En el capítulo dos se indica el procedimiento constructivo de las lumbreras con anillos prefabricados incluyendo los portales de entrada y salida del escudo.

En el capítulo tres se indican los análisis geotécnicos relacionados con los desplazamientos y la estabilidad de las lumbreras durante el proceso de construcción y durante la vida útil de estas estructuras. Para la fase de construcción se describen los análisis de estabilidad de la trinchera perimetral, la estabilidad del fondo de la excavación, la estabilidad de las zonas críticas por la extrusión de las arcillas como son los portales, agregando el análisis de desplazamientos. Para un largo plazo se indica la influencia del hundimiento regional y los efectos de la ocurrencia de los sismos.

En el capítulo cuatro se presenta una lista de lumbreras construidas con el método de anillos prefabricados, indicando diversos tipos de lumbreras, por ejemplo las de captaciones, las de túneles para el drenaje profundo y para las plantas de bombeo de aguas combinadas con el gasto de hasta los 80m³/s.

En el capítulo cinco se llega a conclusiones sobre el grado de seguridad, la rapidez del proceso de construcción, los ahorros, la sencillez para los constructores sin experiencia y las posibilidades para utilizar el procedimiento constructivo en otros tipos de proyectos.

2 Descripción del procedimiento

El procedimiento constructivo (referencia iv) de las lumbreras con anillos prefabricados se ideó para los suelos de muy baja resistencia al esfuerzo cortante, de muy alta compresibilidad, con agua subterránea en condiciones hidrodinámicas como es el subsuelo de la zona de Transición y del Lago del Valle de México. También, es un procedimiento donde se pueden controlar los desplazamientos de suelo para evitar los daños a las estructuras e instalaciones vecinas.

La idea deriva de la metodología de construcción de túneles en suelos blandos que consiste en tres fases (referencia v):

- Excavación, se estabiliza a muy corto plazo con algún método, por ejemplo aire a presión, lodos bentoníticos, tierra balanceada o algún otro. El propósito de la estabilización a muy corto plazo es evitar el colapso y los desplazamientos excesivos del subsuelo durante el periodo de construcción desde el inicio de la excavación hasta la colocación del ademe primario.
- Durante la estabilización a muy corto plazo se implementa rápidamente el revestimiento primario o temporal que crea un ambiente estable a corto y a mediano plazo, por medio de elementos estructurales prefabricados, que pueden soportar las cargas y los requerimientos de la obra de construcción como son las cargas gravitacionales de suelo, presiones hidráulicas de agua subterránea, cargas debidas a la operación de las maquinas de construcción, y el manejo de los elementos prefabricados; pero todavía no cumple con las condiciones a largo plazo como son la resistencia y otros requerimientos como es la durabilidad, la calidad del concreto, etc.
- La obra definitiva se obtiene con la construcción de un revestimiento definitivo capaz de soportar las cargas y desgastes del servicio a largo plazo según los códigos y las normas preestablecidas como son por ejemplo las normas para las estructuras de ingeniería de medio ambiente, sanitarias, y otras.

La idea del procedimiento de construcción de túneles en sentido horizontal se adaptó en las lumbreras en sentido vertical.

El método se originó a raíz de una serie de fallas y problemas de construcción de lumbreras descritas en los capítulos anteriores.

En los siguientes subcapítulos se presenta la secuencia del procedimiento constructivo de las lumbreras de los anillos prefabricados

2.1. Construcción de los brocales

La utilización de los brocales data de las primeras lumbreras construidas en la Zona de Lago. Se construyen (figura 29) dos tipos de brocales: el exterior e interior. El brocal exterior, en nuestro caso, tiene los siguientes propósitos:

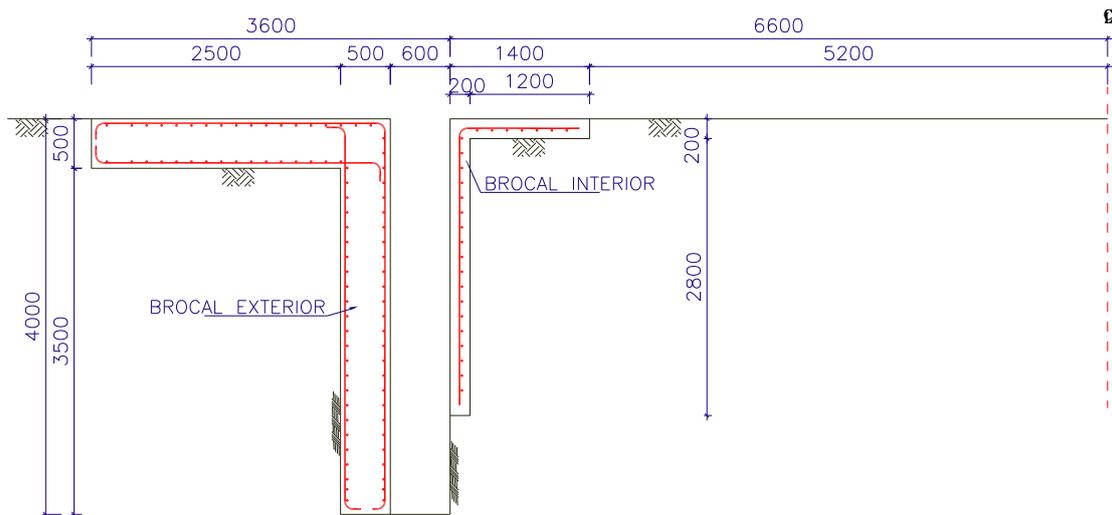


Figura 29. Sección vertical diametral de los brocales interior y exterior, elevación (unidades en mm).

- Estabilizar los bordos de la excavación.
- Brindar una sujeción segura al primer anillo a través de las traves guía de acero estructural, (figuras 30 y 31) durante el intervalo entre su fijación al brocal y el colado y posterior fraguado de la primera losa de fondo.

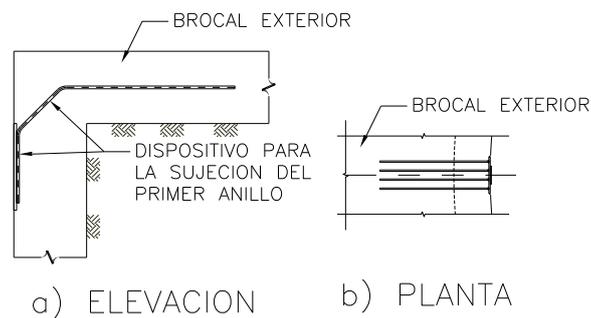


Figura 30. Dispositivo de sujeción del primer anillo incorporado en el brocal exterior en planta y elevación.

- Proporcionar la guía al equipo de excavación de la trinchera perimetral.
- Soportar la maquinaria pesada (grúas, camiones y otras).

El brocal interior (figura 29) tiene la única función de servir como guía del equipo de excavación: almeja guiada. Puede notarse que las dimensiones y las cantidades de acero de refuerzo de su sección estructural son inferiores a las del brocal exterior.

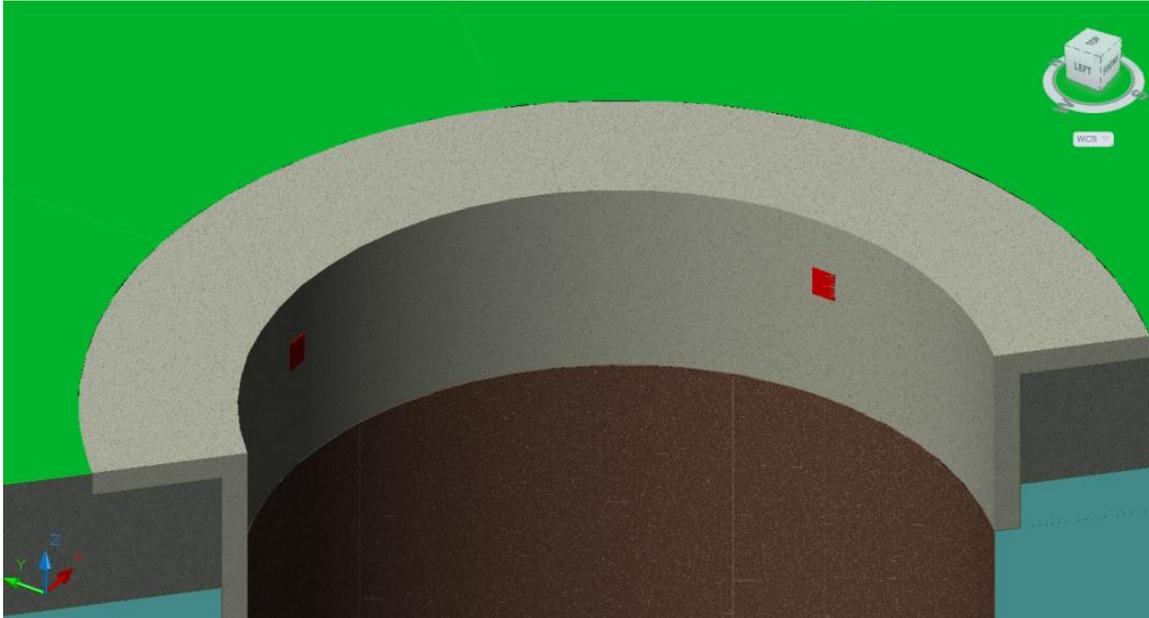


Figura 31. El brocal exterior con las placas de sujeción (rectángulos rojos).

Es importante indicar que, antes del inicio de la construcción del brocal exterior, se retira la capa superficial de rellenos no controlados, la capa vegetal, basuras, material suelto y de alta permeabilidad ($k > 1/1000 \text{ cm/s}$, donde el k = coeficiente de permeabilidad), hasta llegar al suelo impermeable y de media a alta consistencia. En el caso de suelo muy permeable ($k > 1/1000 \text{ cm/s}$) en el cual se pretende desplantar el brocal exterior, este se debe mejorar por medio de inyecciones para disminuir su permeabilidad, aumentar su resistencia y evitar la erosión por el paso de agua. La socavación del subsuelo del brocal exterior es un problema muy común durante las lluvias. Para evitar este fenómeno y las consecuencias como es el colapso del brocal es necesario desplantarlo en subsuelo impermeable, resistente a la erosión por las filtraciones de agua.

2.2. Excavación del suelo para alojar la lumbrera

La excavación del suelo implica el retiro de grandes volúmenes de suelo y agua del espacio cilíndrico que posteriormente ocupará la lumbrera. En el caso de suelos de alta resistencia es posible realizar la excavación a cielo abierto sin casi ningún problema de estabilidad y excesivos desplazamientos de suelo, tanto en el sitio del proyecto de la misma lumbrera, como en las áreas vecinas. En las zonas densamente urbanizadas del Lago y de Transición del Valle de México, pueden presentarse graves incidentes de colapsos locales, generales y/o catastróficos en las obras de lumbreras, así como los importantes daños en las estructuras e instalaciones vecinas por exceso de desplazamientos del suelo (referencia iii). Para evitar los inconvenientes mencionados, la excavación se realiza con extrema precaución siguiendo los procedimientos adaptados a las tecnologías disponibles (referencia ii) y a las leyes de la física expresadas en la mecánica de suelos (referencia vi).

La intención central en el diseño del procedimiento de excavación y de otras fases de construcción de las lumbreras es: evitar o minimizar los cambios de esfuerzos efectivos y de presiones hidráulicas en todos los puntos del subsuelo que rodean la obra desde las regiones más cercanas hasta las distancias en donde el ruido ambiental los hace insignificantes (referencia vii). Esto se está logrando sustituyendo el peso del suelo y agua excavada con algún otro medio que restituye el peso retirado y proporciona el soporte al suelo que queda en su sitio original (referencia viii). Para restituir el peso del suelo y proporcionar un soporte igual al suelo original en la frontera de la excavación actualmente se utilizan las suspensiones bentoníticas o de otros tipos que disponen de tixotropía (referencia ix). También, en caso de subsuelos impermeables en todas las profundidades desde la superficie hasta el fondo de la excavación se utilizó agua simple como el fluido de estabilización, sin tener problemas de estabilidad.

2.2.1 Excavación de la trinchera perimetral

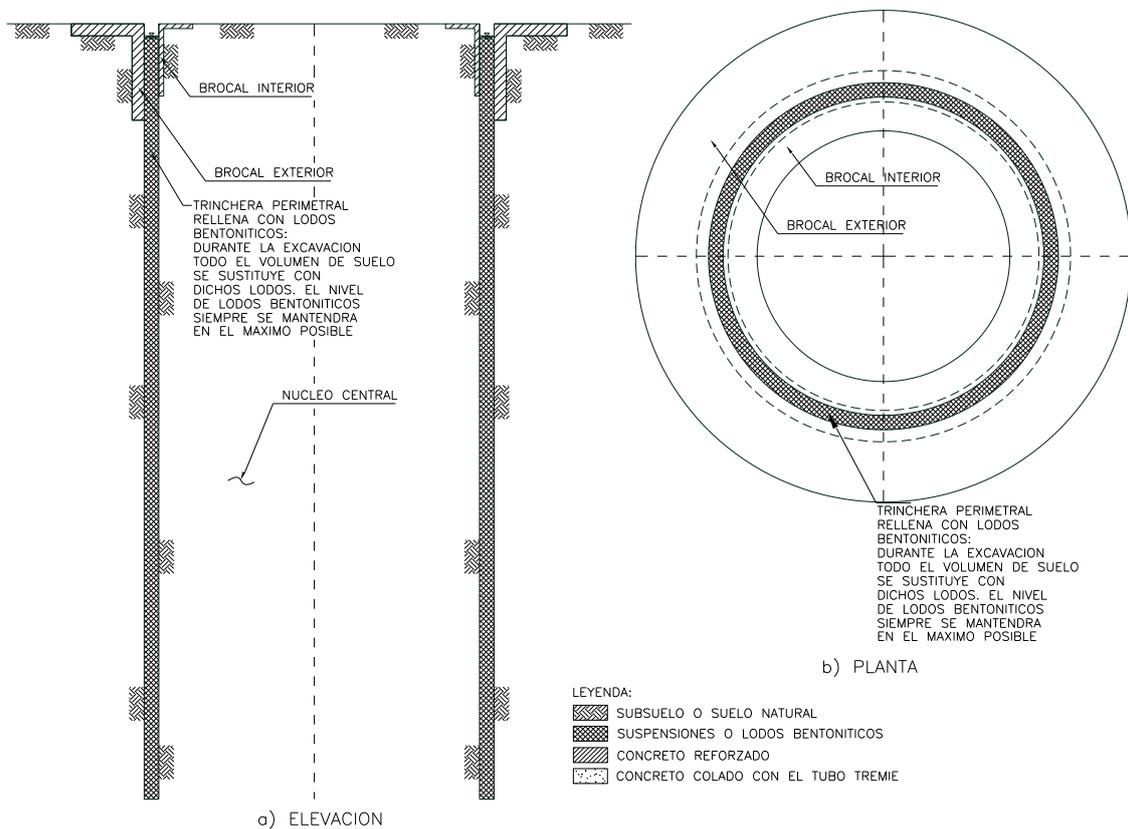


Figura 32. Excavación de la trinchera perimetral con almeja guiada, sección diametral, elevación y planta.

La trinchera perimetral (ver figura 32) se excava dentro del área (vista en planta) entre los brocales exterior e interior y tiene el propósito de asegurar la verticalidad de la pared-frontera entre la excavación (cilíndrica) y el suelo circundante por varias causas, como son por ejemplo entre otras:

- Las tradiciones y costumbres internacionales en este tipo de obras y suelos.

- Disponibilidad del equipo confiable y económico para las excavaciones en las profundidades de 30 a 40m.
- Las funciones que la lumbrera debe proporcionar como es el transporte vertical de la superficie al fondo y viceversa.
- El mínimo espacio que lumbrera debe ocupar.
- Indicaciones de otras especialidades de ingeniería aparte de la ingeniería geotécnica y estructural como son hidráulica y en muchos casos la electromecánica, de medio ambiente y otras.
- La vertical o el ángulo de 90° con la horizontal del fondo de la excavación es el extremo mínimo razonable donde se puede lograr la estabilidad a corto plazo (varias semanas) de la pared de la excavación en los suelos del proyecto.

Durante la excavación de la trinchera perimetral el procedimiento de excavación no se divide en sectores hexagonales o en alguna otra disposición, como era la costumbre en los procedimientos anteriores. La excavación se realiza en todo el perímetro y baja en forma de la espiral lineal con la pendiente definida por el equipo de excavación.

El amplio uso de los lodos o suspensiones bentoníticas se debe a los beneficios como son por ejemplo:

- La estabilización de las paredes y del fondo de excavación,
- La reducción de los desplazamientos de suelos en el sitio de proyecto y áreas vecinas,
- El sellado de los estratos permeables sin cohesión, portadores de agua subterránea que tienden a desprenderse y provocar colapsos locales y generales de las paredes de la excavación,
- Las operaciones de colado de las estructuras de soporte temporales como son pantallas y losa de fondo primaria.

Las reglas que usualmente se aplican en las obras se mencionan en los siguientes capítulos (referencia ix).

La densidad mínima de lodos bentoníticos es del orden de 1.07 t/m^3 . La viscosidad de embudo de Marsh se elige en la obra de acuerdo con el material más permeable que la excavación debe atravesar y se mantiene constante durante el resto de la obra. Por ejemplo, para atravesar el limo con arena fina sumergida en agua subterránea la viscosidad de embudo de Marsh deber estar entre los $38\text{s}/946\text{cm}^3$ a $43\text{s}/946\text{cm}^3$. Si la excavación posteriormente atraviesa los materiales de arena con grava sumergidos en el agua subterránea, la viscosidad de embudo de Marsh debe incrementarse a valores entre los $55\text{s}/945\text{cm}^3$ y $65\text{s}/945\text{cm}^3$. Para todos los suelos posteriores que no exigen la viscosidad mayor de los $55\text{s}/945\text{cm}^3$, esta se debe mantener igual a los $55 \text{ s}/945\text{cm}^3$. Los rangos de las viscosidades de embudo Marsh se elegirán de acuerdo con la siguiente tabla:

EL TIPO DE SUELO QUE COMPRENDE LA EXCAVACION	RANGO DE VISCOSIDAD MARSH
Arcilla	27-32 s/945cm ³
Arena limosa	29-37 s/945cm ³
Arena fina a gruesa	38-43 s/945cm ³
Arena con grava	42-47 s/945cm ³
Grava	60-70 s/945cm ³

Tabla 2. El rango de viscosidad Marsh en función del tipo de suelo que cruza la excavación.

El agua que se emplea debe cumplir con la norma NOM C-122-1982. De acuerdo con dicha norma, se realizarán el muestreo y las pruebas de laboratorio. Los registros de los resultados deben ser aprobados por la supervisión y estar disponibles en la obra durante el proceso de mezclado. Es posible utilizar otro tipo de agua siempre y cuando se comprueba su efectividad por medio de las pruebas de laboratorio correspondientes, y teniendo la seguridad que no altera el fraguado de concreto y mortero.

La bentonita se agrega poco a poco a la corriente de agua agitada. El mezclado se continúa por medio de mezcladoras mecánicas. Es necesario dejar en reposo la mezcla unas horas para lograr una completa hidratación de bentonita muy cercana al 100%.

Las pruebas de calidad de las suspensiones bentoníticas se realizan por medio de las pruebas de densidad, viscosidad, filtro presurizado, contenido de arena y mediciones de pH. Los puntos de muestreo son mezcladora, excavación y planta de tratamiento de lodos.

El programa de pruebas se realiza de acuerdo con las siguientes reglas:

i.-Después de mezclado se mide:

- la densidad,
- la viscosidad de embudo Marsh,
- la resistencia de gel a 10min,
- filtración presurizada.

ii.-Diario se checan en los depósitos por verter, en la excavación y en la planta de tratamiento de lodos:

- la densidad,
- la viscosidad de embudo Marsh,
- contenido de arena,
- filtración presurizada.

iii.-Inmediatamente antes de la colocación de concreto al fondo de la excavación con el tubo tremie en las muestras del interior de la excavación se mide:

- la densidad,

- la viscosidad de embudo Marsh,
- contenido de arena,
- pH

Las mismas pruebas se realizan durante y/o después de los eventos extraordinarios que ocurren en la excavación como son por ejemplo: después de lluvias torrenciales, desprendimientos o derrumbes de bloques de tierra de las paredes de la excavación, importante contaminación de lodos con el material de suelo natural u otros como es la infiltración de agua de drenaje, después de abandonos de la obra donde lodos permanecieron en el reposo durante largos periodos.

Los lodos deben cumplir una serie de requisitos para satisfacer las funciones como son por ejemplo:

- el soporte de las paredes y fondo de las excavación,
- el sellado de los materiales granulares de suelos permeables,
- mantener los sólidos en suspensión por los tiempos más largos y así minimizar la no deseada sedimentación de materiales al fondo de la excavación que puede contaminar el concreto,
- permitir el colado de concreto sin contaminarlo,
- lograr la trabajabilidad de lodo que consiste en la capacidad de ser bombeado por el equipo disponible en la obra

Cada una de las funciones requiere que las propiedades de los lodos se encuentren dentro de los intervalos que indican en la siguiente tabla:

FUNCION	CONCENTRACION PROMEDIA DE BENTONITA %	DENSIDAD G/CM3	VISCOSIDAD PLASTICA cP	RESISTENCIA DE GEL A 10MIN G/M2	pH	CONTENIDO DE ARENA %
SOPORTE DE PAREDES DE EXCAVACION	>11.9%	>1.07				1%*
PROCESO DE SELLADO	>11.9%					1%
SUSPENSION DE SOLIDOS	>11.9%			>586		
DESPLAZAMIENTO POR EL CONCRETO	<15%	<1.25	<20		<12	<25%
BOMBEO DE LODOS (TRABAJABILIDAD)	>3-4% <15%	>1.07 <1.25	<20	>586	<12	>1% <25%

Tabla 3. Límites de las propiedades de los lodos para su utilización como el fluido de la estabilización de la excavación, sellador de materiales permeables y medio de colado de concreto con el tubo Tremie.

La viscosidad de Marsh se mide por medio de un embudo de dimensiones estandarizadas en el cual se vierte 1500cm³ de lodos después de retirar los suelos gruesos (de tamaños de granos mayores de 0.074mm). El tiempo de salida de 946cm³ se expresa como la viscosidad en segundos. El agua a los 21 grados centígrados tiene viscosidad de 26 segundos para 946 cm³.

Viscosímetro rotatorio: en estos aparatos la muestra de lodos se corta entre dos cilindros. El esfuerzo cortante se deduce del momento de torsión que ocurre en uno de los dos cilindros. El esfuerzo cortante promedio se deduce de la velocidad de rotación medida y del diámetro de dos cilindros.

La medición de la densidad se expresa por peso-de-lodo/volumen. Las mediciones de campo se realizan con la balanza de lodos.

Las mediciones de pH se realizan con método del clorímetro por medio de tiras de papel de prueba o por medio del método electrométrico utilizando los electrodos de vidrio. La utilización de tiras de papel de prueba no es adecuada para altas concentraciones de sales y el método electrométrico no es confiable en suspensiones con altas concentraciones de iones de sodio.

La medición de filtración a presión se realiza para determinar la pérdida de fluido y relacionarla con las características de sello del filtro. Así, baja pérdida de filtratos durante la prueba indica sello de baja permeabilidad. La prueba es indicativa.

2.2.2 Demolición y retiro del brocal interior y excavación del núcleo para alojar la lumbrera

Al terminar la excavación de la trinchera perimetral y la restitución del suelo excavado con los lodos bentoníticos, es importante proceder rápidamente con la demolición del brocal interior y la excavación del núcleo (figura 33 y 34), restituyendo el suelo con las suspensiones bentoníticas.

Es interesante mencionar que el núcleo de la excavación en la mayoría de los casos pierde la estabilidad y colapsa inclinándose hacia la pared exterior de la trinchera perimetral. Los análisis convencionales de estabilidad indican factores de seguridad bajos pero teóricamente suficientes. Algunos fenómenos ocultos para el proyectista que ocurren en el sitio de la construcción son los siguientes:

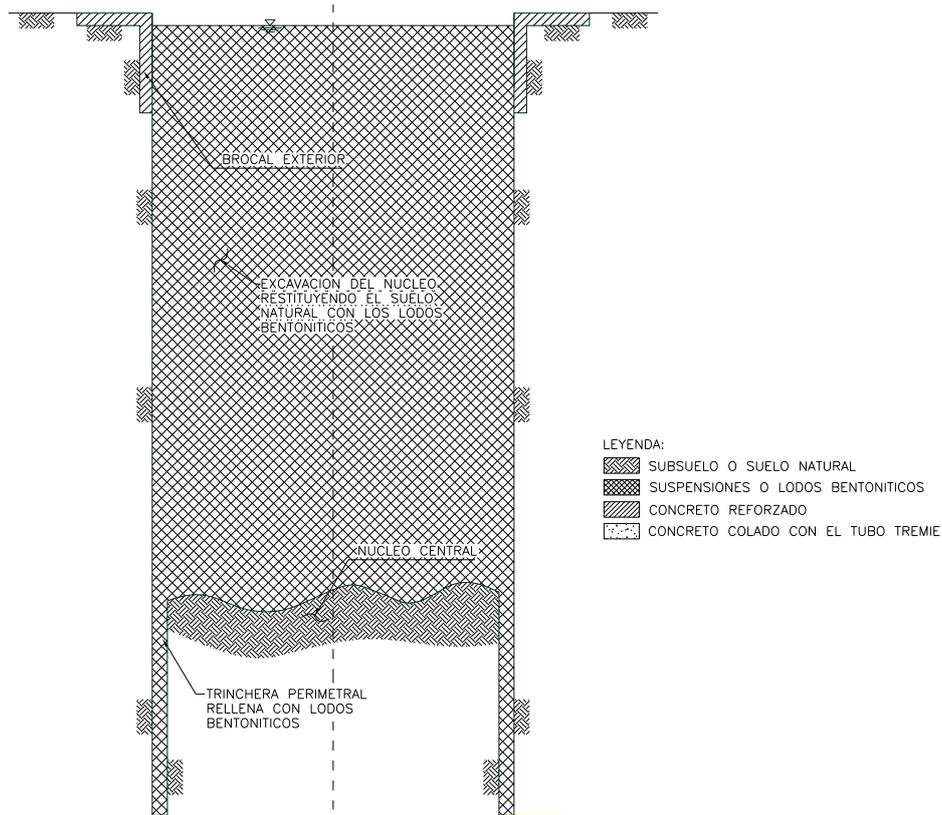


Figura 33. Excavación del núcleo central restituyendo el suelo natural con lodos bentoníticos, sección diametral, elevación.

- El subsuelo consiste de materiales con muy alta deformabilidad y con muy baja resistencia.
- La maquinaria utilizada en la construcción, sobre todo la de excavación, al trabajar induce fuertes impactos durante el transporte, la entrada y salida de almeja a la excavación. El oleaje y ondas compresionales de los lodos bentoníticos generan cargas de corta duración de alta intensidad y difíciles de analizar sin una buena instrumentación y mediciones en la obra. Afortunadamente, las fallas de núcleo nunca han producido un problema de la obra.

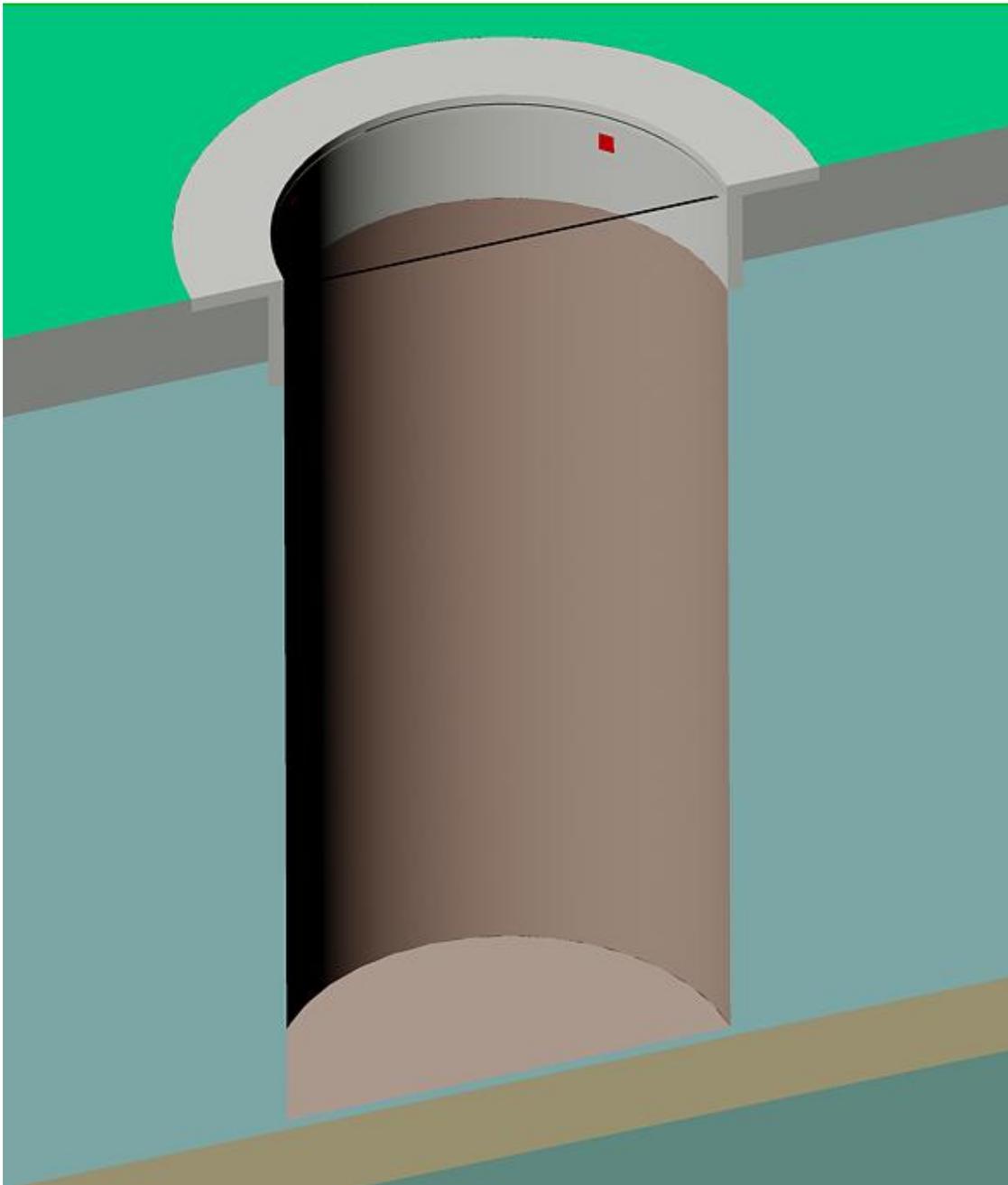


Figura 34. Geometría de la excavación en conjunto con el corte estratigráfico donde se indican las principales unidades, desde la superficie hacia abajo: rellenos heterogéneos (ES), formación arcillosa superior (FAS), primera capa dura (CD) y formación arcillosa inferior (FAI). Escala proporcional.

En general, durante la excavación del núcleo, se vigilan los niveles de los lodos y otras propiedades mencionadas en el capítulo anterior. La única defensa contra el colapso de las paredes, del fondo, de los caídos de fragmentos de suelo de las paredes del borde de excavación y fracaso de la obra se basa en el adecuado manejo de los lodos.

2.3 Construcción de los anillos segmentados

Simultáneamente con la construcción de los brocales y el proceso de la excavación se construyen los anillos 1, 2 y superiores. La construcción de todos los segmentos y

elementos estructurales que constituyen todos los anillos debe terminarse antes o en el mismo instante que la excavación del núcleo para evitar la evolución de la contaminación de los lodos en el interior de la excavación ya que las paredes durante toda la obra presentan caídos, desprendimientos de bloques de suelo, derrumbes o fallas de pequeños taludes verticales de los estratos o lentes de arena y grava que cruzan la excavación.

PRIMER ANILLO

El primer anillo consiste de las siguientes partes:

- a) Ocho dovelas de concreto reforzado (CR), (figura 35), cada una cubriendo un sector de 45° .

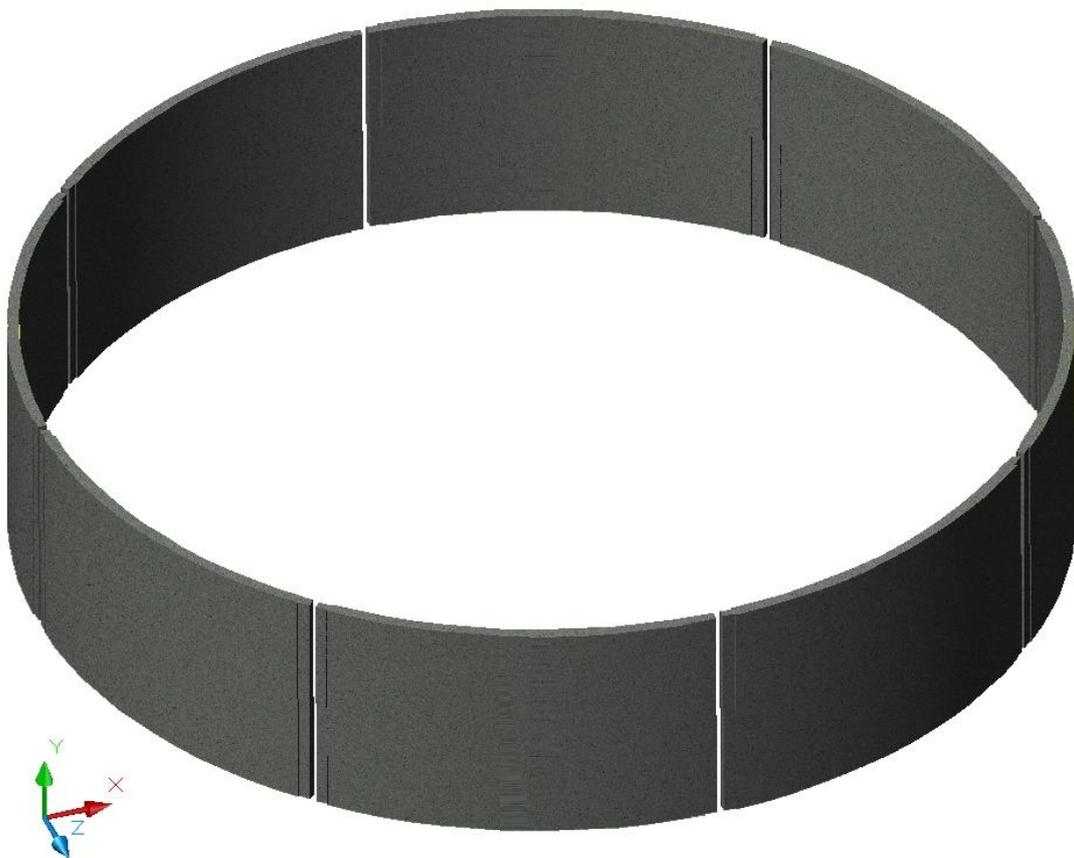


Figura 35. Las ocho dovelas de CR que constituyen el anillo.

- b) Elementos metálicos de conexión entre las dovelas de concreto reforzado, con las traveses verticales, con la estructura interior en forma de estrella y con las placas para sujetar el gancho de las grúas durante las maniobras.



Placas de conexión, disposición completa



Placas de conexión, parte superior

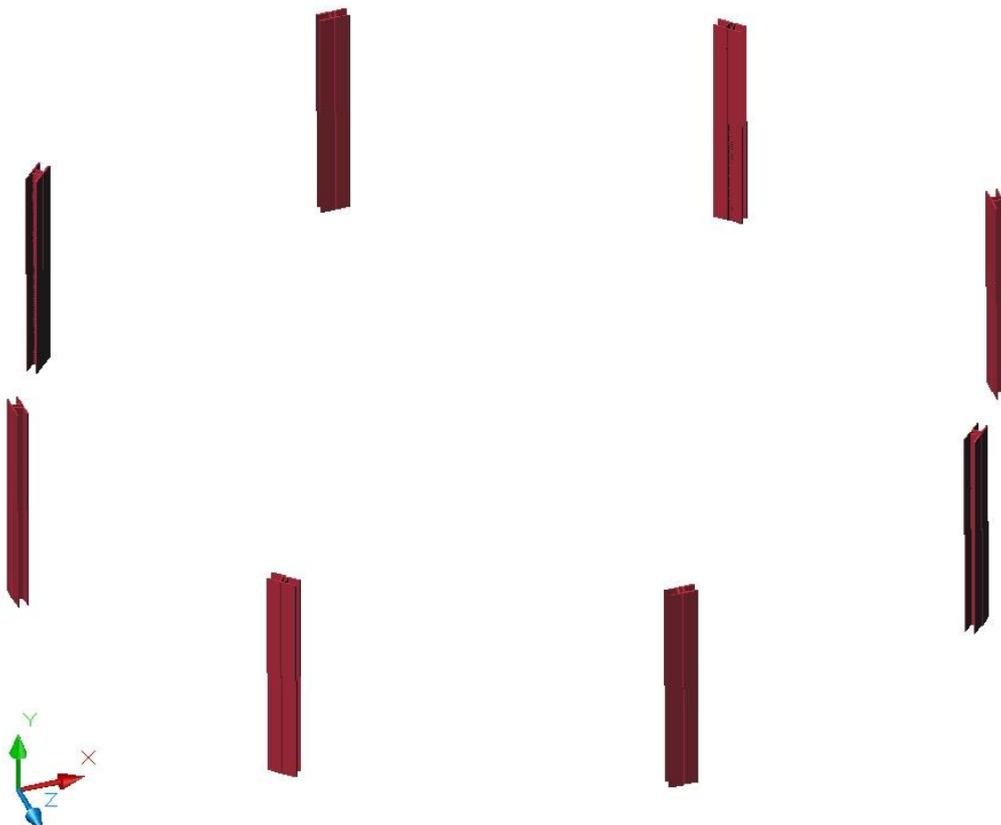


Figura 36. Placas de conexión entre las dovelas de concreto reforzado.

- c) Estructura metálica de acero estructural en forma de estrella que consiste de cuatro traves diametrales que se unen en el centro del anillo y se conectan con los elementos (b) en sus extremos (figura 37). La disposición geométrica de

estrella se seleccionó para permitir la colocación de los tubos tremie para el colado de la primera losa de fondo y la instalación de pilotes en el caso de exceso de la presión hidráulica por debajo de la losa de fondo.

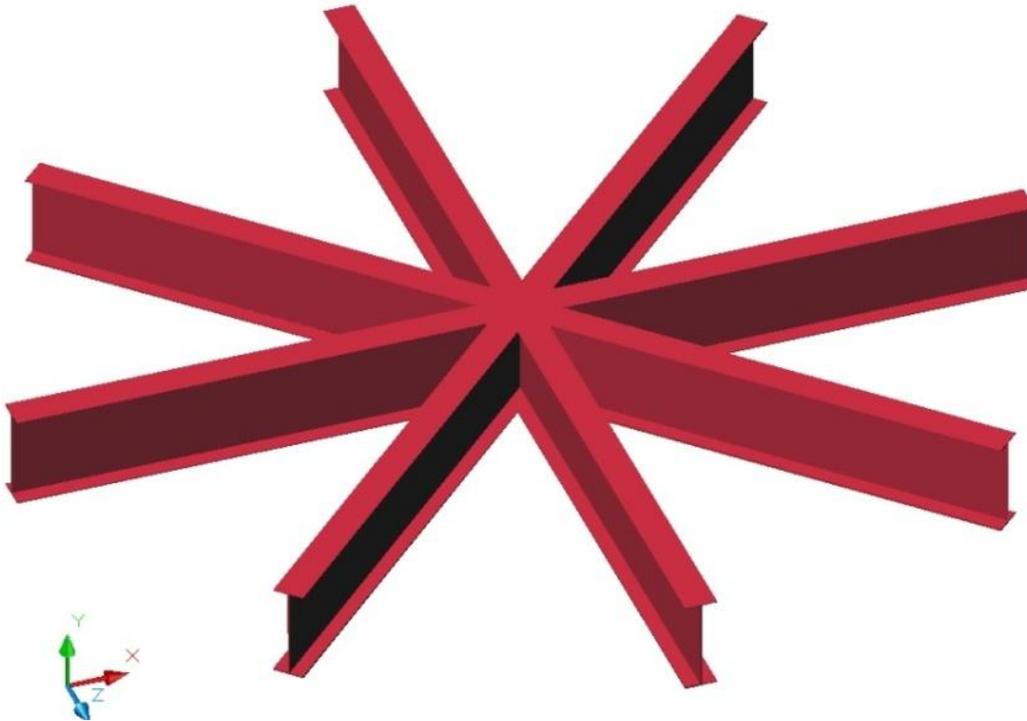


Figura 37. Trabes radiales como refuerzo del primer anillo.

- d) Las cuatro traves-guía de acero estructural tienen la sección estructural del tipo cajón con muy alta resistencia a la flexo-tensión biaxial combinada con torsión. En su parte superior se conecta al brocal a través de las placas previamente instaladas en el brocal (figura 38).

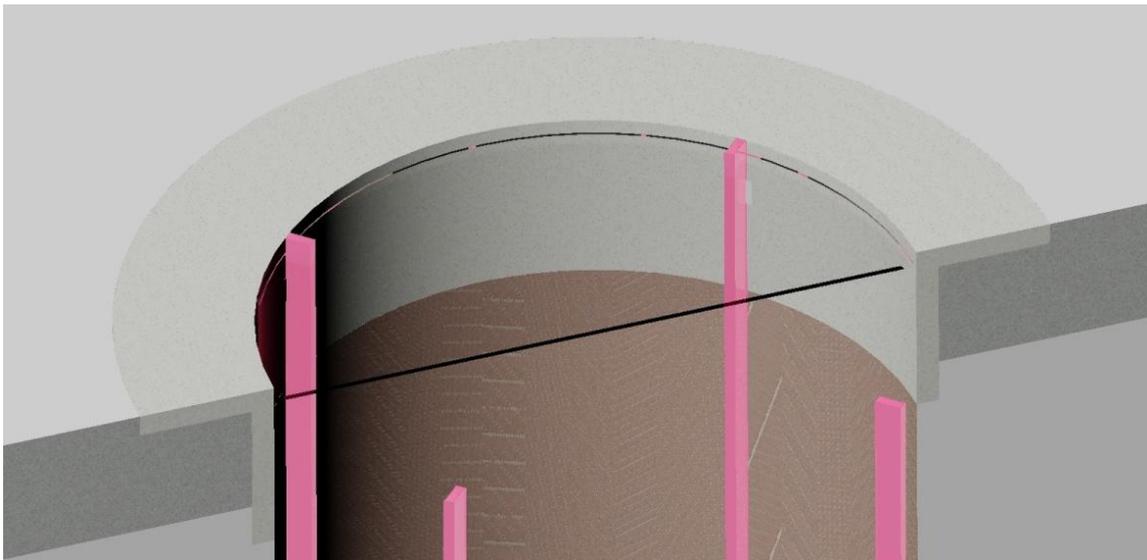


Figura 38. Las traves guía en su parte superior se conectan con el brocal. Puede notarse la superficie de lodos bentoníticos muy cerca de la superficie de suelo, el ES y la FAS.

En su parte inferior las traves-guía verticales se conectan al esqueleto estructural que forman las traves radiales y las placas de conexión entre las dovelas de los anillos (figura 39)

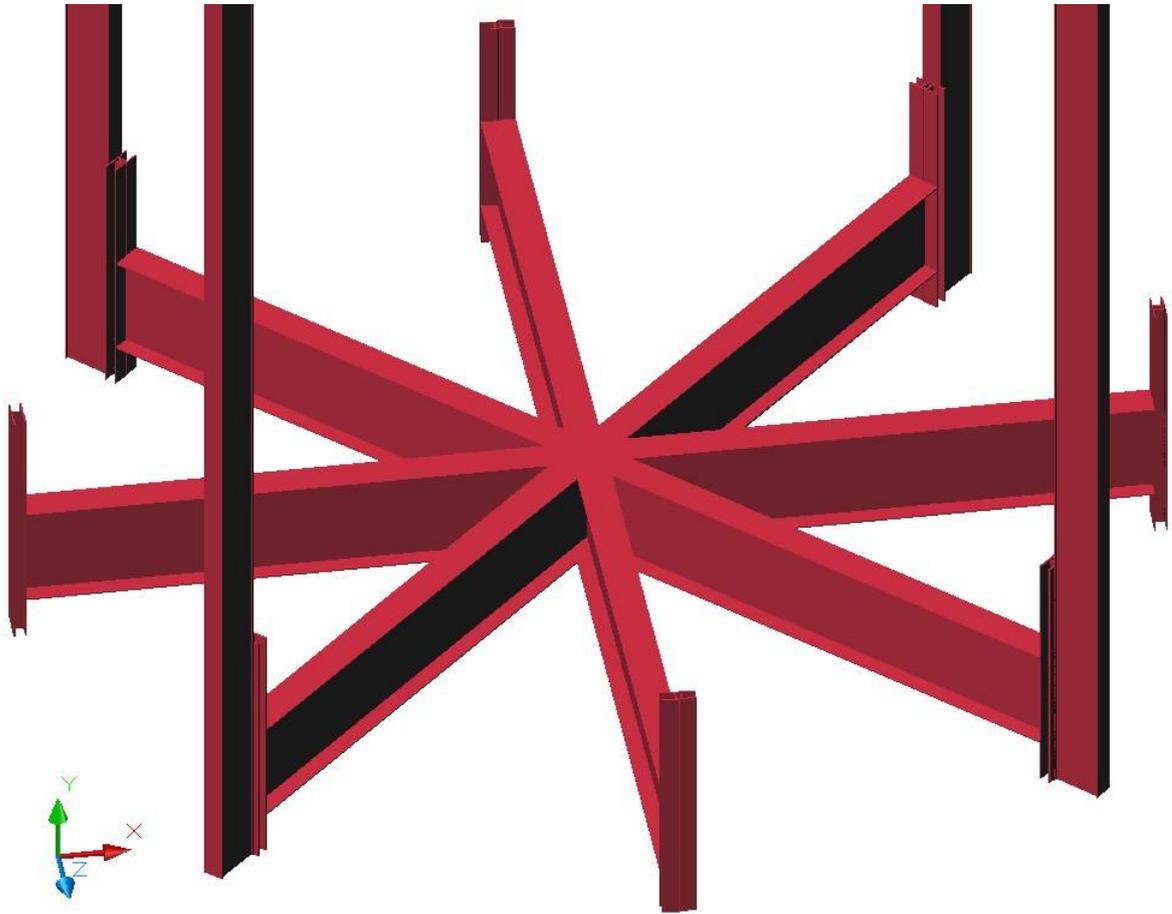


Figura 39. Conexión de las traves-guía con las traves radiales a través de las placas de conexión entre las dovelas de concreto reforzado.

El primer anillo ensamblado consta de las partes (a), (b), (c) y (d), como se indica en la siguiente figura (ver figura 40).

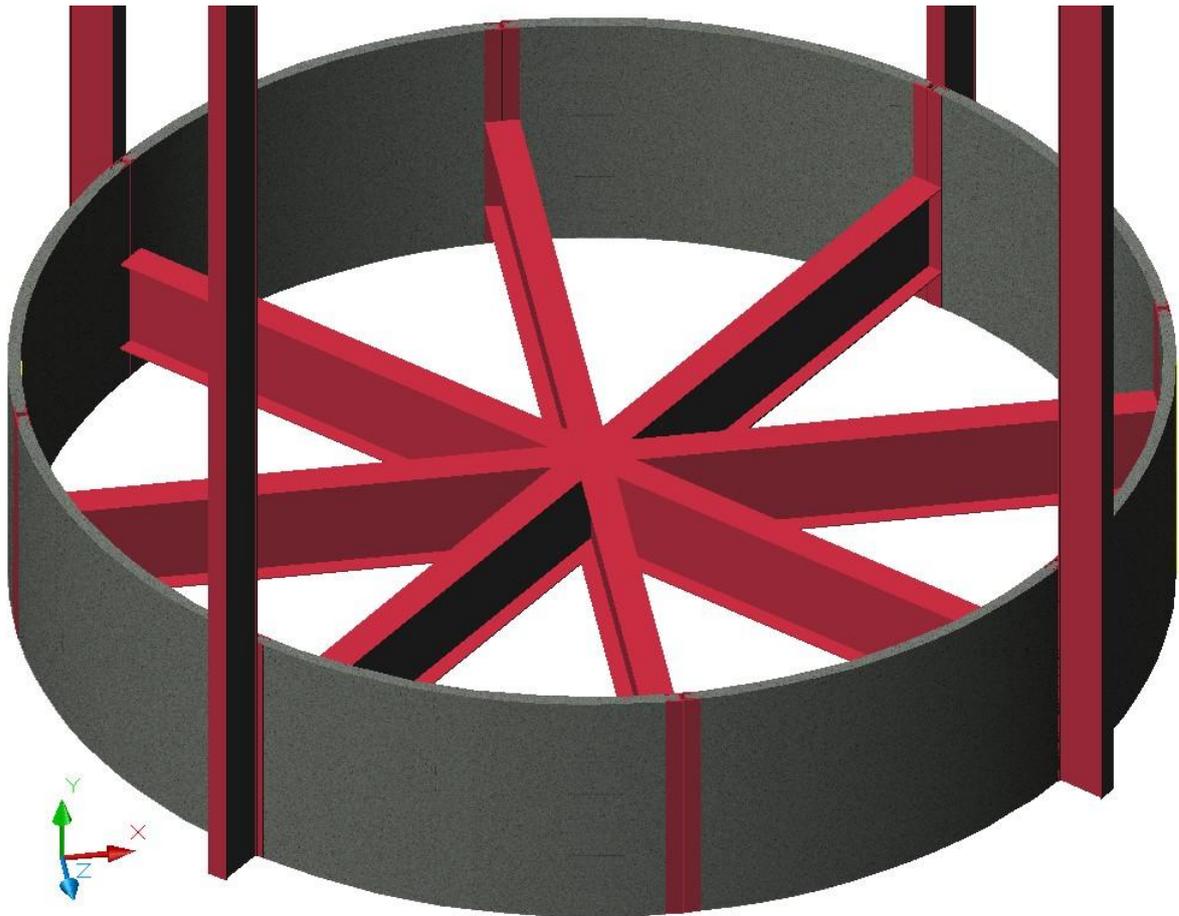


Figura 40. Ensamblando las traves radiales, placas de conexión, dovelas de CR y vigas-guía verticales se obtiene el 1er anillo.

SEGUNDO ANILLO

El segundo anillo consiste de las siguientes partes:

- a) Cuatro dovelas de CR de 45° y dos dovelas de 90° con las zonas de mortero que atravesara el escudo (ver figura 41).



Figura 41. Segundo anillo, dovelas de concreto reforzado con zonas de mortero para facilitar el paso de la zona inferior de escudo.

- b) Los elementos de acero estructural en el segundo anillo consisten de elementos de conexión entre las dovelas como en primer anillo, agregando placas-guía, que quedaran en la excavación en los lados de las traveses verticales-guía para asegurar su posición durante la maniobra de descenso del anillo y de su posicionamiento en su lugar final. También, se implementa un marco de soporte del muro de mortero que se retira antes del paso de escudo (figura 42).

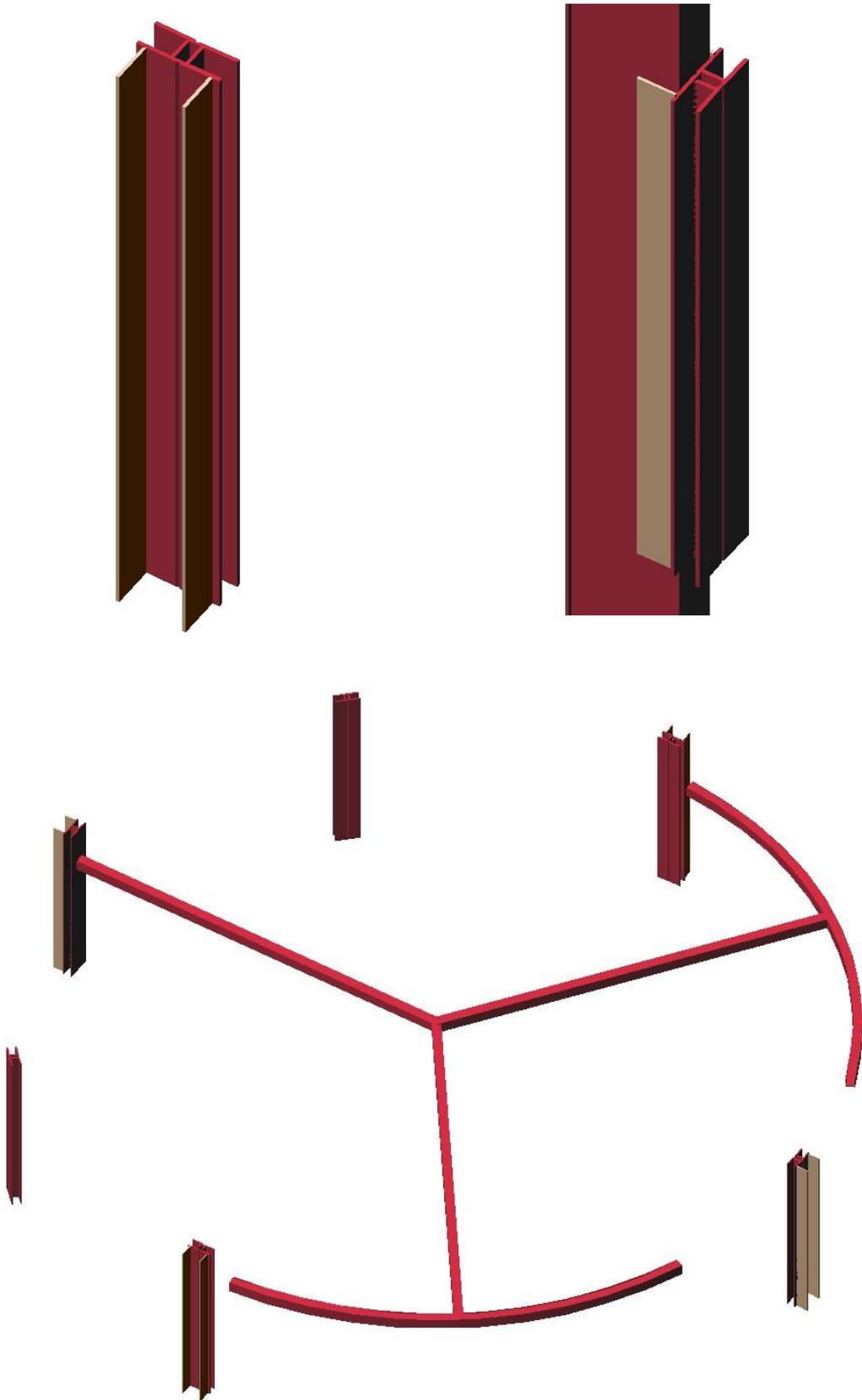


Figura 42. Elementos de acero estructural que se implementan en el segundo anillo: elementos de conexión entre las dovelas de concreto reforzado, placas-guía en lugares de la trabe vertical-guía y marco de soporte de muro de mortero.

El segundo anillo ensamblado para su descenso a la excavación en indica en la figura 43.

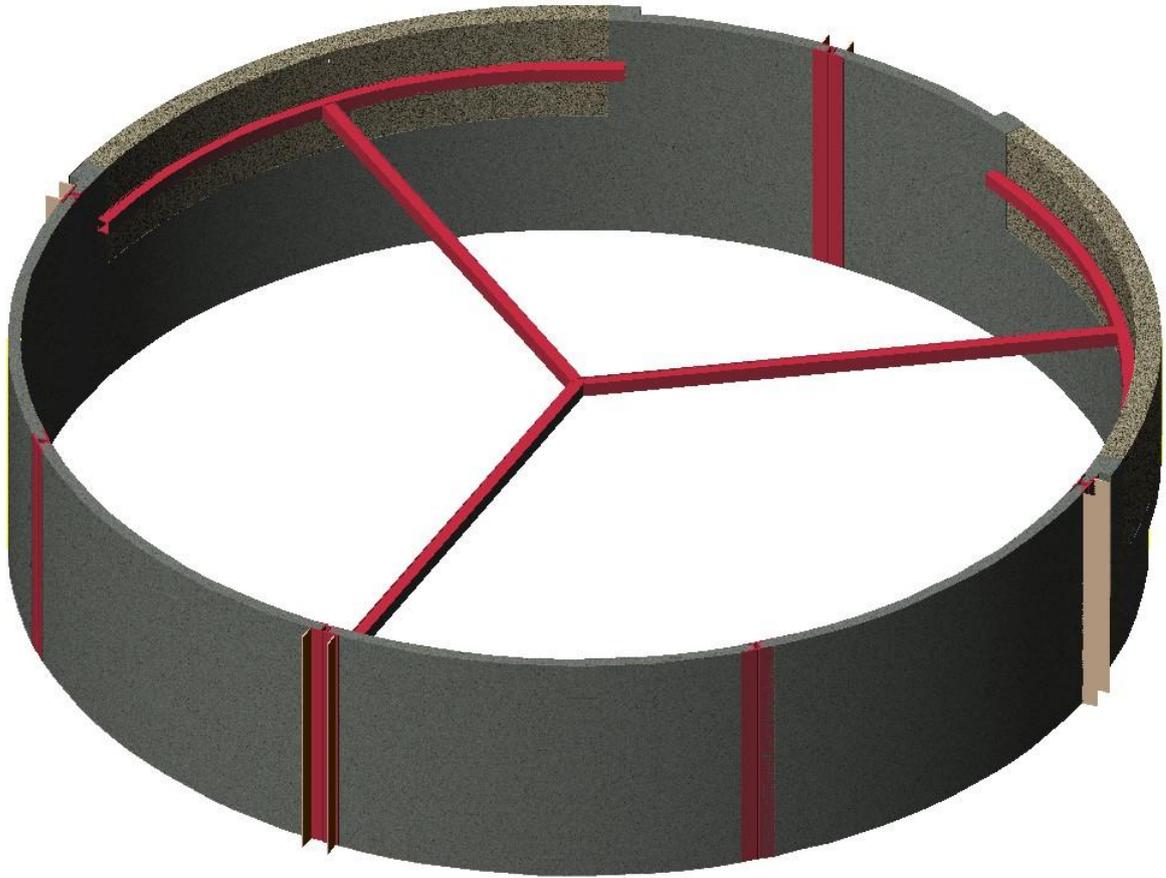


Figura 43. El Segundo anillo ensamblado antes de su inmersión en la excavación, a su posición de proyecto.

TERCER ANILLO

El Tercer anillo es parecido al Segundo anillo con diferencia de que el muro de mortero se extiende a toda la altura del anillo, ya que su posición coincide con la zona central de escudo.

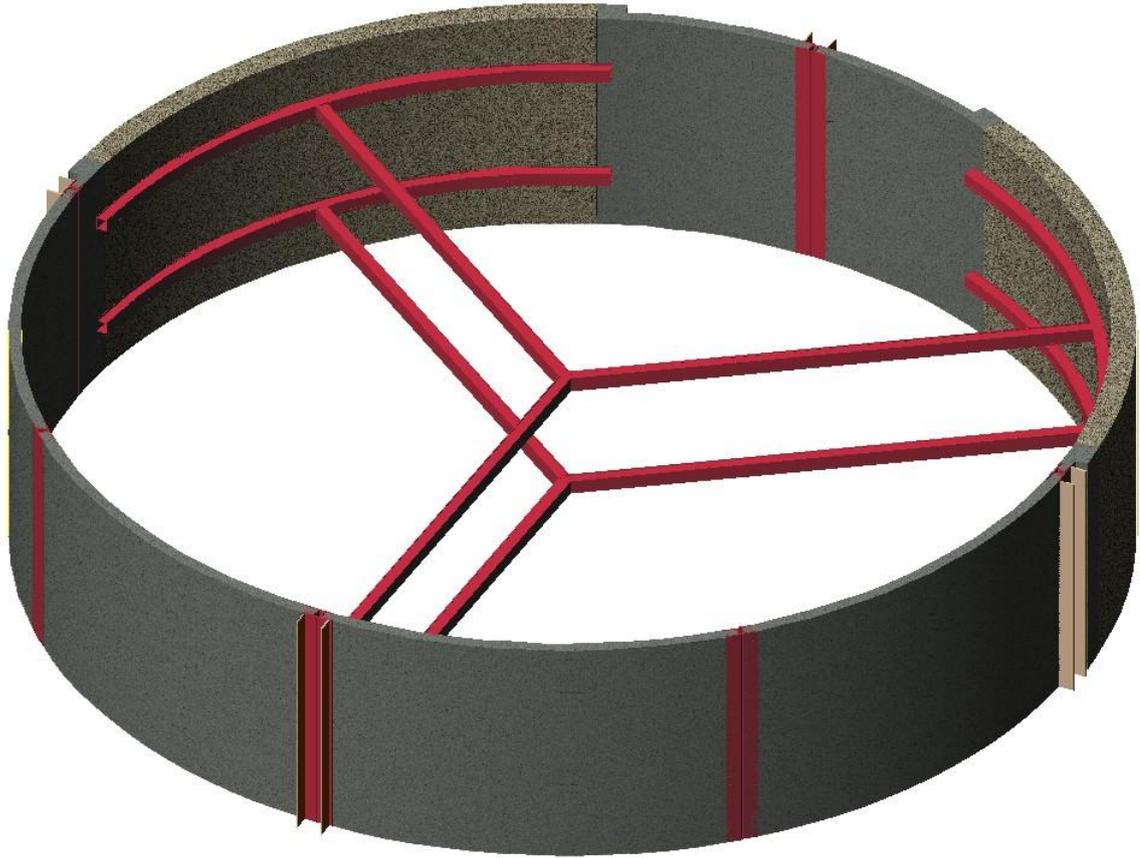


Figura 44. El Tercer anillo ensamblado antes de su inmersión al interior de la excavación, a su posición de proyecto.

En el caso del Tercer anillo, resultó necesario implementar el doble soporte marcos metálicos. En la figura 44 se muestra el Tercer anillo ensamblado, antes de sumergirse a la excavación rellena con lodos bentoníticos.

CUARTO ANILLO

El Cuarto anillo se es muy similar a la imagen de espejo del Segundo anillo por el plano horizontal centrado en el segundo anillo. En el figura 45 se muestra el Cuarto anillo totalmente ensamblado.

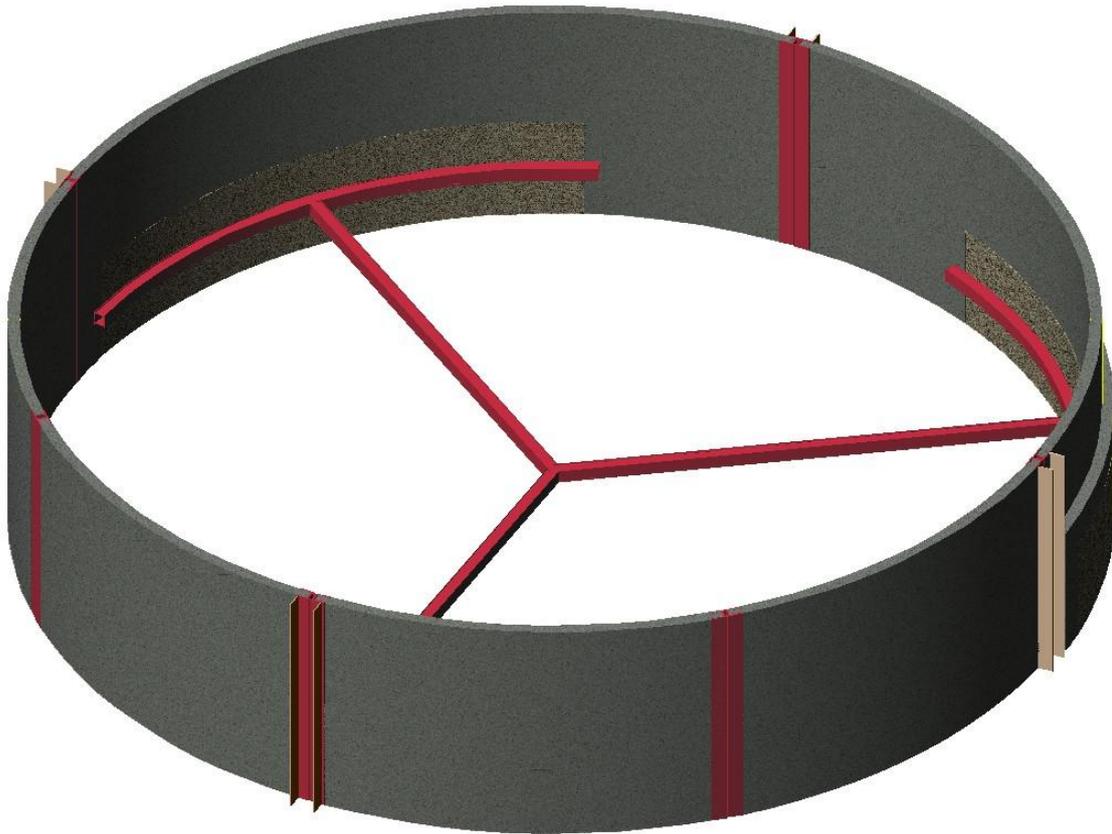


Figura 45. El Cuarto anillo ensamblado.

QUINTO A DECIMO ANILLO

Los anillos superiores del Quinto al Decimo son iguales entre sí. Como se localizan por arriba de la zona de escudo, son más sencillos que los anillos inferiores: consisten de 8 dovelas de concreto reforzado, de placas de conexión y de placas guía. En la figura 46 se muestra un anillo ensamblado, para su utilización como ademe primario. También, pueden notarse las placas guía, para asegurar la posición durante la sumersión y el posicionamiento final.

Los materiales que constituyen los anillos son el concreto de resistencia de diseño a compresión $f'_c=250\text{kg/cm}^2$, el acero de refuerzo con el límite de fluencia de $f_y=4,200\text{kg/cm}^2$ y el acero estructural del tipo ASTM A-36 (con el límite de fluencia de $2,500\text{kg/cm}^2$).

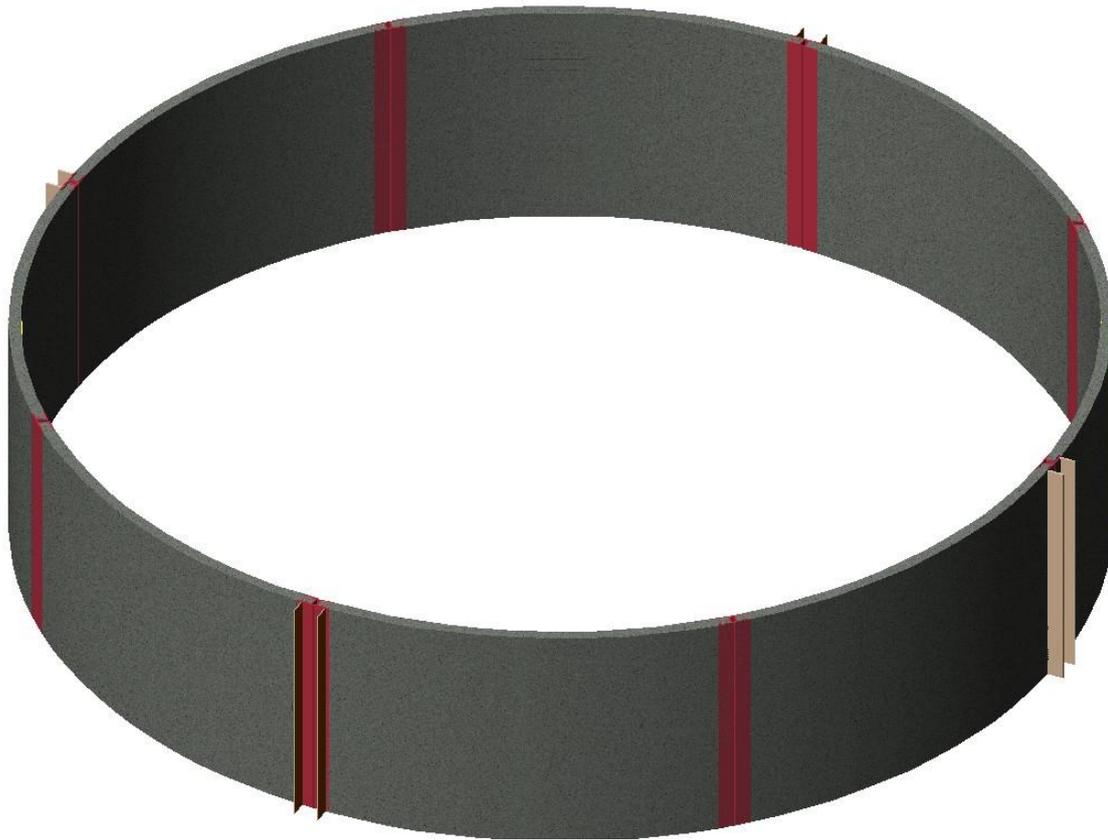


Figura 46. El anillo tipo que representa: Quinto a Decimo ensamblado.

ZONAS DE MORTERO EN LOS ANILLOS SEGUNDO TERCERO Y CUARTO

Para evitar el “mejoramiento” o la restitución de suelo (ver figura 26) de las zonas de entrada y salida de escudo y riesgos asociados a este procedimiento, los anillos que cruzan el túnel, tienen una zona colada con el mortero de resistencia a la compresión de diseño de 30kg/cm^2 . La resistencia seleccionada del mortero, cumple con dos propósitos contradictorios. Por un lado, es necesario mantenerla resistencia suficientemente alta para proporcionar el soporte al suelo, lodo y mortero perimetral antes de su fraguado (que se implementa posteriormente). Por otro lado, la resistencia de mortero debe ser suficientemente baja para que los dientes, la presión del frente y el sistema de bombeo de la rezaga del escudo lo puedan fragmentar y transportar como en una maniobra en suelos blandos con lentes de suelos duros. En otras palabras, la maniobra de tuneo para cruzar el mortero debe estar dentro del intervalo de capacidad de operación permitida del escudo sin causar los daños y atrasos. Es importante mencionar que el bloque del mejoramiento de suelo anteriormente usado tiene regiones con resistencia de mortero a compresión mayor de 150 a 180 kg/cm^2 , las cuales el escudo ha podido atravesar. También, el control de calidad y correcciones en caso de errores de los bloques de suelo mejorado es muy difícil de llevar a cabo ya que pertenece al grupo de construcciones llamadas *obras ocultas*.

Los anillos que disponen de zonas con el mortero compensan la pérdida local de resistencia con refuerzos a base de anillos metálicos. Las superficies exteriores de anillos colados con el mortero se recubren con capas impermeabilizantes para evitar la penetración de fluidos al interior de muro de mortero. El material de mortero se indica en los siguientes capítulos.

2.3.1 Definición del material de mortero para su implementación en la zona del portal

Se presenta una descripción detallada del mortero, ya que este material proporciona grandes ahorros de costos, disminución de tiempo de duración de la obra y calidad de su realización, no es oculto y por lo tanto es posible supervisar, realizar correcciones y obtener la calidad especificada.

2.3.1.1 Preparación de mortero

El diseño de la mezcla del mortero por emplearse en la zona determinada para facilitar el paso del escudo a través de los anillos prefabricados y del revestimiento definitivo de lumbrera es resultado de una serie de investigaciones de laboratorio a partir de la elección de las proporciones de materiales constituyentes y análisis de cada uno de estos. También, se realizaron series de pruebas de resistencia en función de tiempo para verificar su evolución. Se encontró que las especificaciones usuales (El Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, referencia xx, ASTM C270, referencia x, UBC, referencia xi, IBC, referencia **xii**) de dosificación, mezclado, colocación, vibrado y curado son adecuadas para necesidades del proyecto que requieren un mortero impermeable con la resistencia de diseño a compresión entre los 25 a 30 kg/cm².

El mortero para los portales usualmente consiste de las siguientes componentes

- 1 parte de cemento Portland.
- De 1 1/4 partes a 2 1/2 partes de cal hidratada.
- La relación volumétrica entre la arena y la suma de cementantes debe encontrarse entre 2.25 y 3.0.
- Se usa la cantidad mínima de agua que proporciona un mortero fácilmente trabajable. El mortero debe permanecer húmedo para suministrar una unión aceptable entre los componentes de la mezcla.
- A cada metro cubico de la mezcla se agrega 1.0 kg de fibras sintéticas.
- Se añade un aditivo impermeabilizante integral para morteros, a una razón del 2 al 4% del peso del cemento empleado en la mezcla.

Antes de la incorporación del mortero se verifica, por medio de las pruebas de laboratorio establecidas en la norma NOM C 61 (referencia **xiii**), que la resistencia a la compresión del mismo se encuentre dentro del intervalo de las resistencias especificadas

2.3.1.2 Descripción de los materiales que constituyen el mortero del portal

α) ARENA

La granulometría de la arena por emplearse en la elaboración de este mortero se describe en la siguiente tabla:

Malla	Porcentaje que pasa
3/8"	100
No. 4	95 al 100
No. 8	80 al 100
No. 16	50 al 85
No. 30	25 al 60
No. 50	10 al 30
No. 100	2 al 30
No. 200	4 al 6

Tabla 4 Definición de la granulometría de arena como agregado pétreo para el mortero que se incorpora en los anillos.

Es crucial que los granos presenten una alta resistencia y no tengan poros ni oquedades interiores.

β) CEMENTO.

Se utiliza el cemento Portland tipo I.

γ) AGUA.

El agua que se emplea para fabricar la mezcla cumple con la norma NOM C-122-1982. De acuerdo con dicha norma se realiza el muestreo y las pruebas de laboratorio. Los registros de los resultados se corroboran por la supervisión y se mantienen disponibles en la obra durante el proceso de mezclado.

δ) FIBRAS SINTÉTICAS

Las fibras sintéticas se agregan a la mezcla para obtener una resistencia a tensión de mortero similar a la de compresión y transformar un material frágil a un material isótropo y dúctil, con el propósito de evitar agrietamientos por varias causas como son el exceso de esfuerzos a tensión por la excedencia de las cargas debidas a la contracción, flexión, temperatura, etc.

Las fibras por emplear cumplen con las siguientes características:

- Calibre de 004 a 007 (.004" a .007")
- Gravedad específica de 0.9
- Punto de fundición mínima a 160
- Resistencia a la tensión mínima de 560 kg/cm² a la temperatura del medio ambiente.
- Longitud de 50 mm.

El material sintético que se utiliza habitualmente son las fibras es Nylon 6.12.

ε) ADITIVO IMPERMEABILIZANTE

Para evitar el paso de agua a través del cuerpo de mortero, en la mezcla se emplea un impermeabilizante integral, sin que modifique su resistencia, que en mercado parece con el nombre Festegral o algún otro con características similares.

2.3.1.3 Descripción del mezclado de mortero

La consistencia del mortero se ajusta tratando de que alcance una fluidez mínima compatible con una fácil colocación. Los materiales se mezclan mecánicamente en un recipiente no absorbente.

Previamente al mezclado debe evitarse la segregación de arena, ya que las variaciones en su granulometría pueden originar cambios en la consistencia del mortero.

Si el mortero empieza a endurecerse, puede remezclarse hasta que vuelva a tomar la consistencia deseada, pudiéndosele agregar agua, si es necesario, en proporciones que no alteren en forma considerable la resistencia a la compresión del mismo.

Los morteros deben usarse dentro de un lapso de dos horas a partir del mezclado inicial.

El equipo y el método utilizados para colocar el mortero deben evitar la separación del agregado que conforma a la mezcla. Además, es conveniente disponer el equipo de manera que el mortero no tenga problemas en el lugar determinado para su colocación: lo más cercano al lugar definitivo del mortero.

2.3.1.4 El vibrado y el curado del mortero

δ) VIBRADO

La mejor manera y la más rápida para eliminar el aire dentro del mortero y compactarlo es la vibración.

Las mangueras flexibles de los vibradores deben ser lo suficientemente largas para que el vibrador llegue hasta el fondo, removiéndose entonces la lechada, producto de los trabajos de vibrado sobre la mezcla.

El colado debe hacerse lo más uniforme posible en capas horizontales, evitando la formación de cúmulos y capas inclinadas.

Durante el proceso de vibrado debe asegurarse un correcto colado y una correcta compactación de la primera capa de mortero sobre la superficie de concreto reforzado, evitándose, también, la formación de juntas frías.

β) CURADO

En lo que respecta al curado, debe tenerse presente que lo más importante es conservar húmeda la superficie del mortero. No debe permitirse que se seque, pues así se evitará el agrietamiento y fragilidad en la estructura de mortero.

El curado debe conducirse de tal forma que en ningún momento el mortero carezca de la humedad y del control de temperatura necesarios, para que así la hidratación continúe desarrollando la totalidad del potencial de resistencia y durabilidad del mortero.

2.3.1.5 El tratamiento de las juntas de colado en las superficies de contacto con el concreto endurecido

Es fundamental lograr una liga estructural en la superficie de contacto entre el concreto reforzado y la masa de mortero. Se describe la manera cómo lograr la unión entre estos dos materiales.

El primer requisito para alcanzar una buena adherencia en las juntas de colado es que la superficie de concreto a la que se adhiere el mortero esté, limpia y tenga el aspecto de agregado expuesto y no suelto.

En las juntas de colado se aplica un sellador que al mortero y al concreto les dé una buena adherencia.

2.3.1.6 La impermeabilización de las superficies exteriores de mortero

El método de curado de mortero considera la aplicación de capas de impermeabilización en las superficies exteriores y la colocación de membranas impermeables con la doble finalidad de evitar, a la vez, la pérdida de humedad del mortero y la entrada de agua en el área protegida.

En las superficies exteriores del mortero se aplica un impermeabilizante asfáltico o algún otro con características similares.

Las membranas impermeables se colocan después, sobre la capa de impermeabilización asfáltica.

Previamente a su colocación, se verifica que las membranas no estén picadas o dañadas.

2.3.2 El concreto y el acero de refuerzo para los anillos

El concreto y el acero de refuerzo utilizado en la construcción de los anillos prefabricados son materiales convencionales utilizados en la construcción de elementos estructurales que se especifican en las Normas Técnicas Complementarias para el diseño y Construcción de las Estructuras de Concreto Reforzado.

La resistencia de diseño a compresión de concreto es de $f'_c=250\text{kg/cm}^2$ y el límite de fluencia del material de acero de refuerzo de varillas corrugadas es de $f_y=4,200\text{kg/cm}^2$.

2.3.3 El acero estructural utilizado en los anillos

El acero estructural que se utiliza en la construcción de los anillos es también el material convencional especificado con la norma ASTM A-36, donde el límite de fluencia es de $f_y=36,000 \text{ lb/plg}^2$ (libras por pulgada cuadrada) o $f_y=2,500 \text{ kg/cm}^2$.

2.4 Colocación del primer anillo

Terminando la excavación y la construcción de los elementos que constituyen todos los anillos, se procede con la colocación del primer anillo integrado a las travesaños-guía verticales, al interior de la excavación al nivel de proyecto. En el instante del posicionamiento del anillo al lugar de proyecto, las travesaños-guía verticales se ligan a las placas metálicas ancladas en el brocal exterior de la excavación (figuras 30 y 31). Antes de la sumersión del primer anillo, se realiza una exhaustiva limpieza de fondo de la lumbrera, de las paredes de la excavación así como de los propios lodos de la excavación, restituyéndolos y retirando los contaminantes, para eliminar las obstrucciones. La recirculación intensiva de los lodos se mantiene permanente.

El nivel inferior del primer anillo queda unos 60 cm por arriba del fondo de la excavación para permitir el flujo de concreto de la losa de fondo primaria hacía la pared de la excavación y de esta manera establecer el sello (figuras 41 y 42).

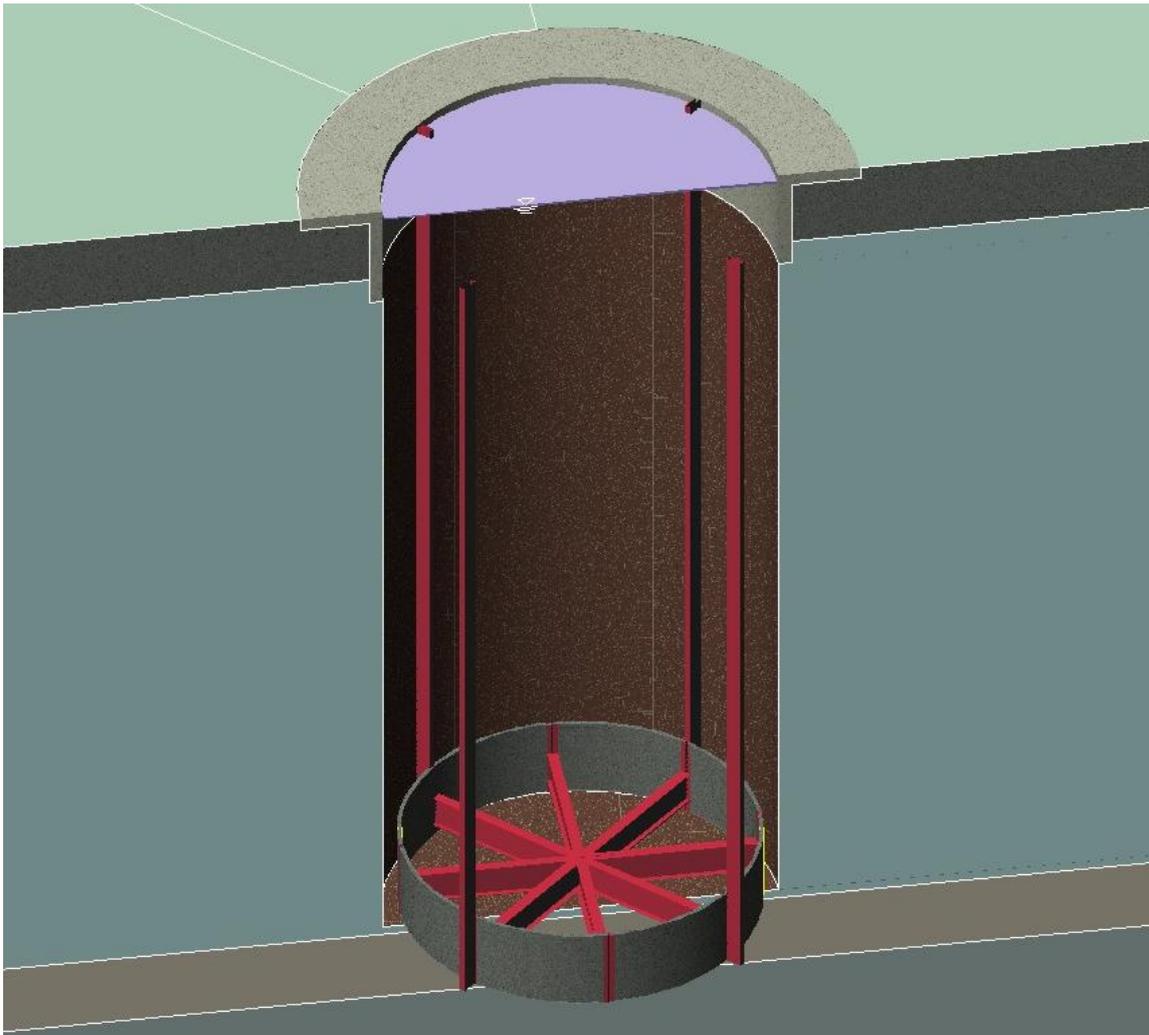


Figura 47. Primer anillo instalado en el interior de la excavación. Puede notarse la superficie de lodos cercana a la superficie de suelo. También se indican las principales unidades estratigráficas del subsuelo: ES, FAS, CD y FAI.

La maniobra de instalación del primer anillo se realiza con la mayor velocidad posible para evitar la contaminación del fondo de la excavación y posibilitar el colado de la primera losa de fondo en un ambiente libre de contaminantes.

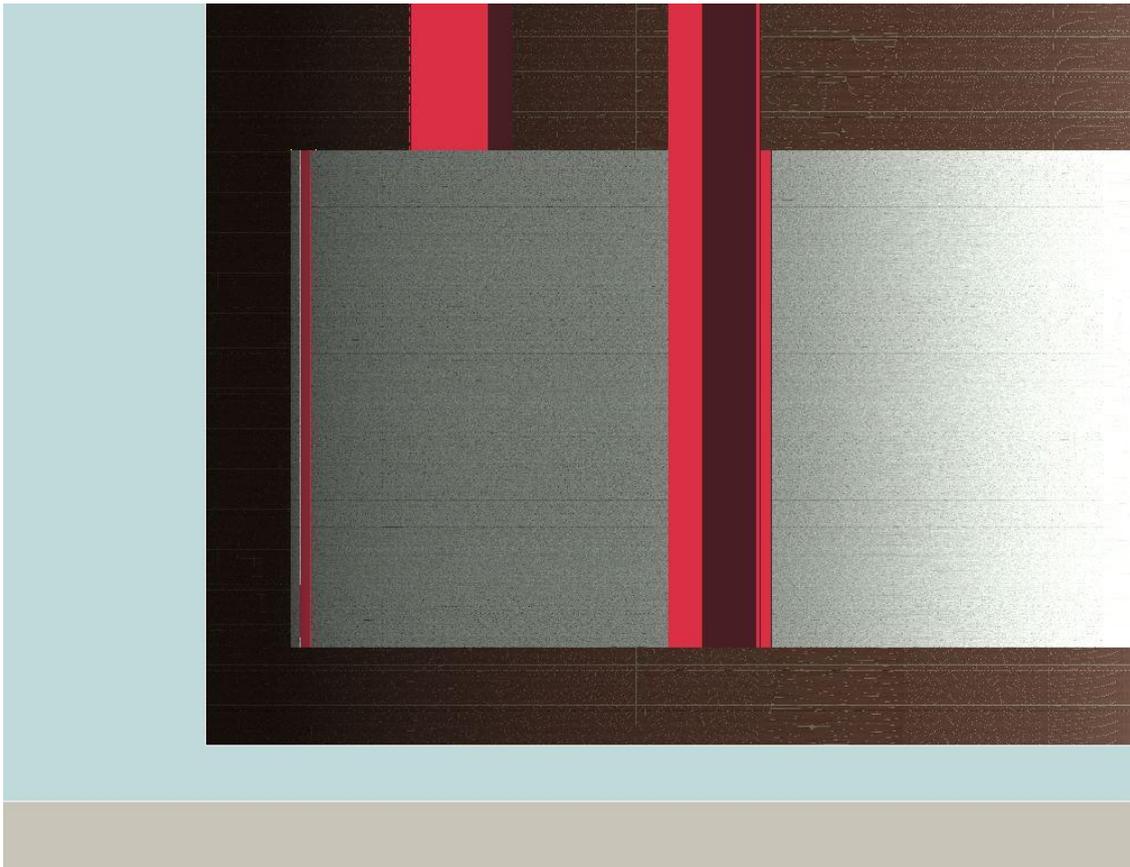


Figura 48. El espacio libre entre el primer anillo, las paredes y el fondo de la excavación. Puede notarse la FAS y CD.

Los factores de seguridad durante la colocación del primer anillo hasta el colado de la primera losa de fondo llegan a su mínimo para todo el periodo de la obra.

2.5 Colado de la Primera losa de fondo

Después de la inmersión de primer anillo y su fijación al brocal por medio de las trabes-guía verticales se procede con el colado de la losa de fondo primaria por medio de tubos tremie. El número de tubos tremie para el colado de la losa se elige de tal manera que el colado se realice en un turno, dejando cada uno de los tubos siempre sumergidos en concreto hasta el final de colado. Esta medida es necesaria para disminuir la contaminación de concreto. Antes del inicio de colado deberá asegurarse la limpieza de la excavación, de las paredes, así como del fondo. También se verifican los límites de las propiedades de los lodos indicados en la tabla 3. El colado debe proceder sin demoras para evitar el desarrollo de la contaminación de los lodos y sedimentación en el fondo de la excavación.

Cuando el concreto de la losa de fondo llega a los 10% de su resistencia de diseño puede continuarse con el descenso de los anillos superiores.

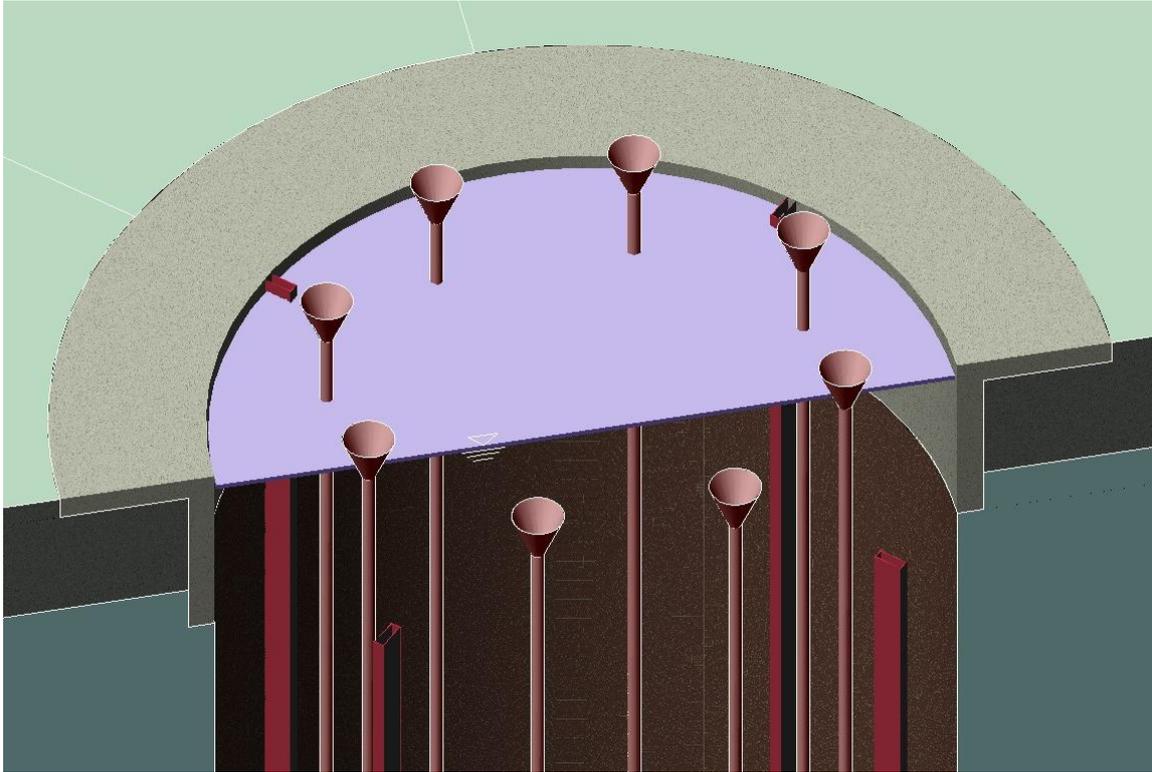


Figura 49. Posicionamiento de los tubos tremie en los ocho sectores de 45°.

Para lograr un colado en el corto tiempo, homogéneo, con mínima contaminación, usualmente, el colado se realiza simultáneamente por los ocho tubos tremie dispuestos en sectores de 45° (figuras 49 Y 50).

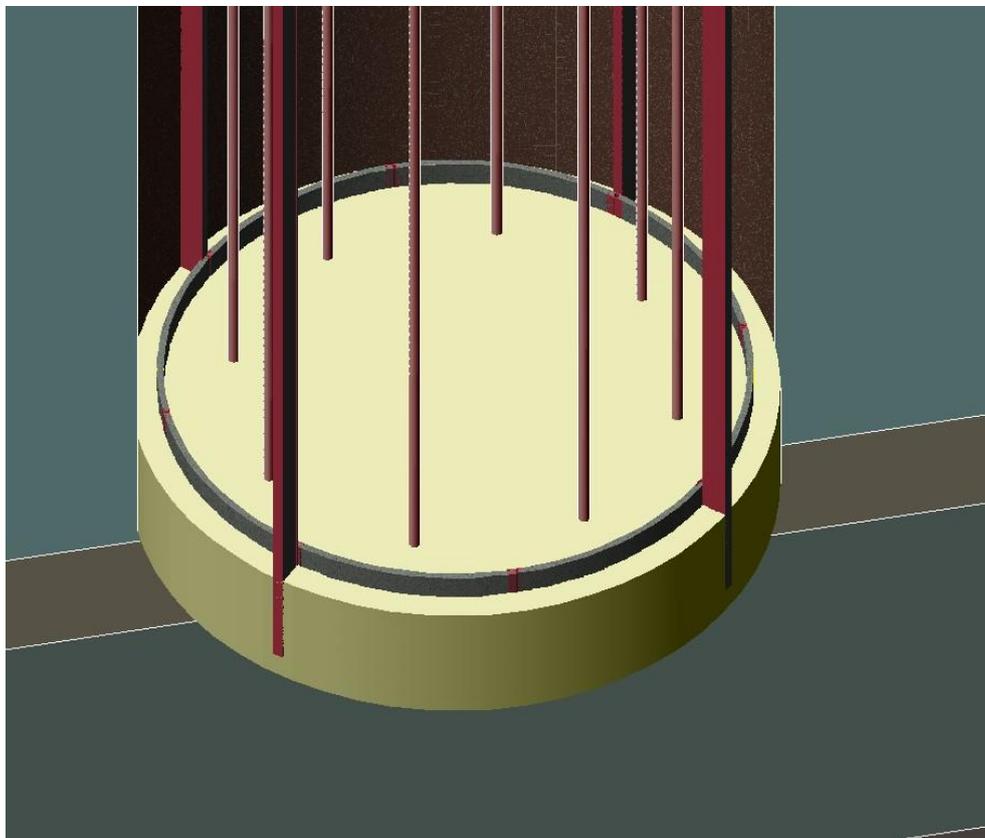
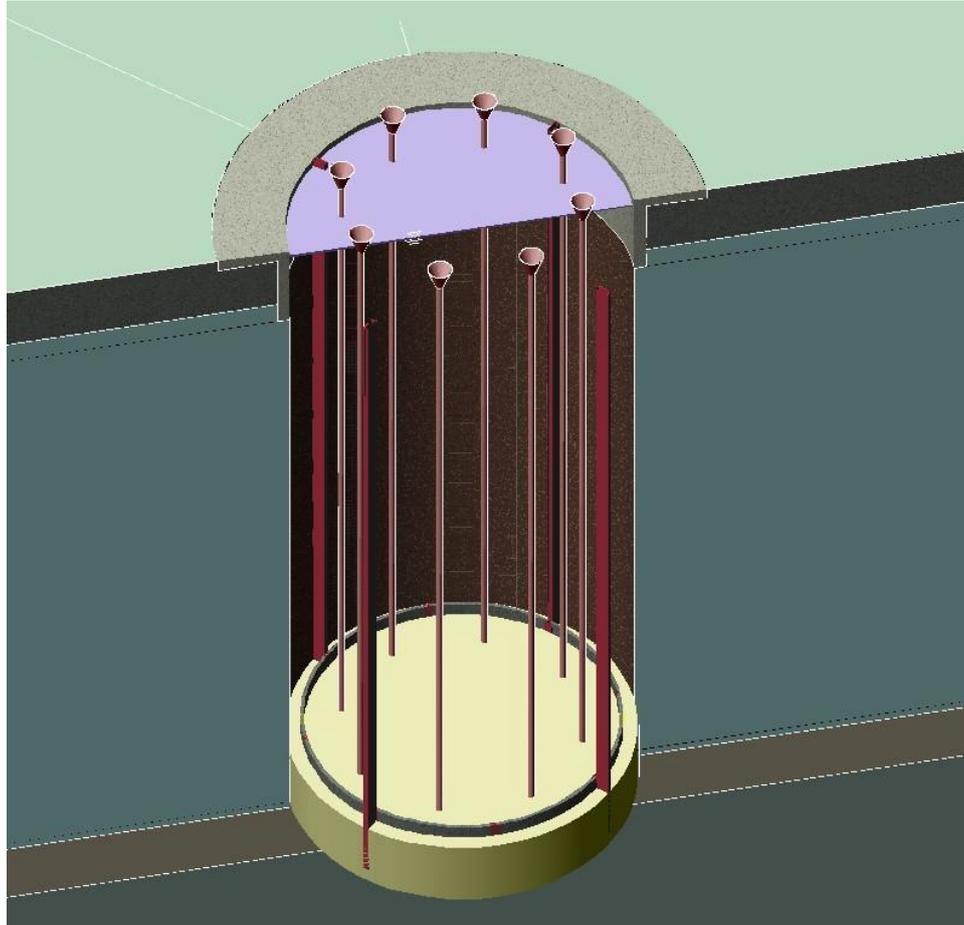


Figura 50. La Primera losa de fondo

El concreto deberá disponer de fluidez para llenar los espacios entre el Primer anillo y las paredes de la excavación.

2.6 Sumersión de los anillos superiores

Después del colado de la Primera losa de fondo se procede con la colocación de los anillos superiores: del Segundo al Decimo. La posición de los anillos en la excavación se indica en la figura 51.

Se utilizan las traveses-guía para guiar el segundo anillo desde la superficie hasta el nivel de apoyo en el primer anillo. La tolerancia de la posición geométrica de los anillos es usualmente de 2 cm en sentido horizontal y vertical. Después de la sumersión del segundo anillo, se colocan los anillos subsecuentes hasta el último superior.

Los anillos se pueden ensamblar en el sitio de la obra fuera de la excavación o en el caso de espacios reducidos, pueden ensamblarse por arriba de la excavación, formando un anillo de ocho dovelas.

En el caso de ensamble de las dovelas de anillo por arriba de la excavación, puede evitarse el uso de las grúas muy costosas de grandes capacidades de alrededor de 50t simultáneamente con el radio de pluma extendido de 7 a 8m, que también, ocupan grandes espacios. En su lugar pueden ocuparse grúas de menor capacidad (~10t) y con menor radio de acción de la pluma (~3m).

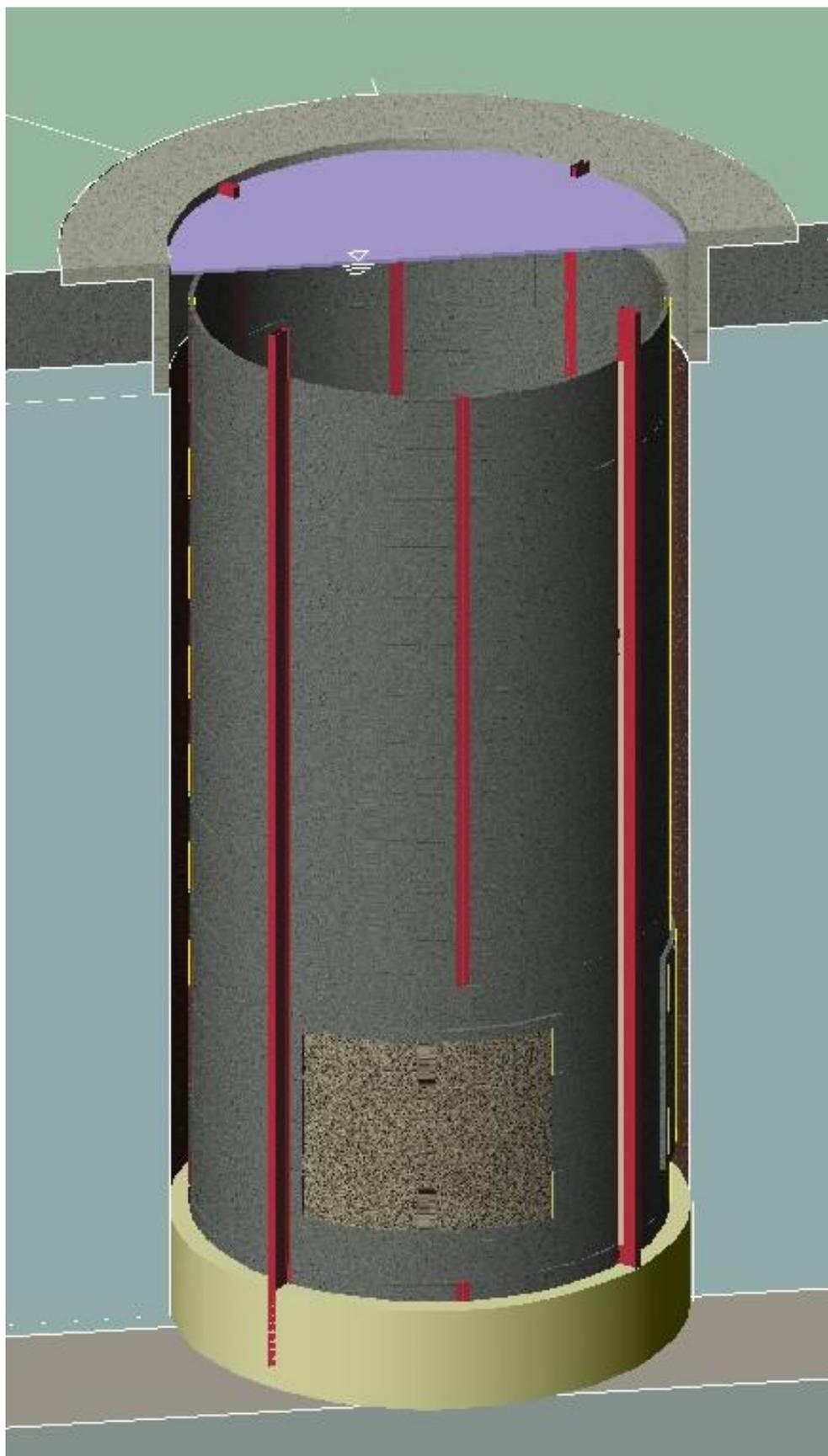


Figura 51. Anillos prefabricados en el interior de la excavación, en su posición del proyecto.

2.7 Colocación del relleno perimetral entre los anillos y el suelo natural

Terminando la colocación de los anillos, se rellenará el espacio anular entre las paredes exteriores de los anillos y las paredes de la excavación con la mezcla de mortero-bentonita de resistencia a la compresión entre los 10 a 30kg/cm².

También, podrían sustituirse lodos en los espacios perimetrales con la mezcla cemento-agua-bentonita a base de recirculación de los mismos lodos agregando el cemento y bentonita hasta llegar a la mezcla homogénea de resistencia requerida.

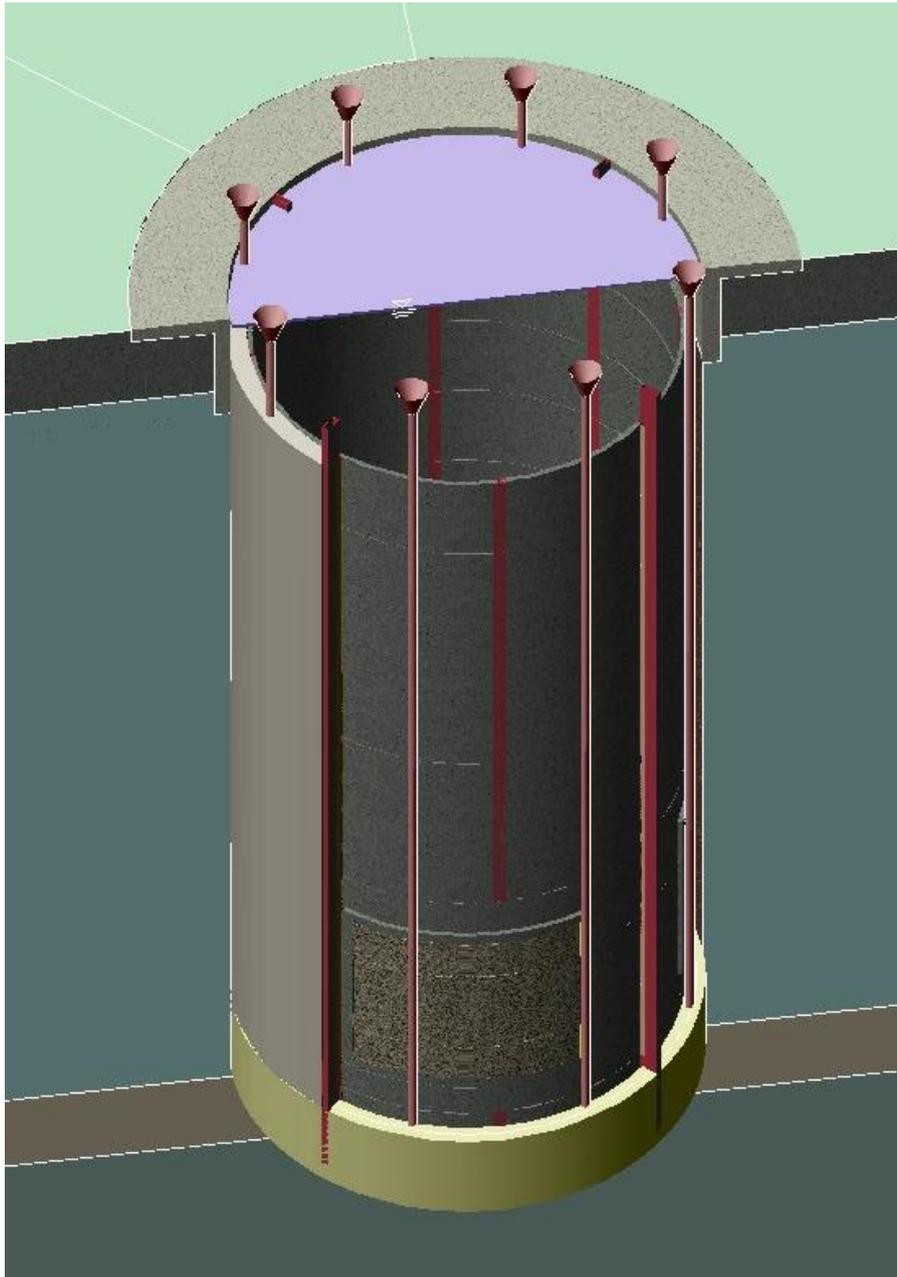


Figura 52. Colocación del relleno perimetral con el tubo tremie. Las dos celdas vacías se muestran para ilustrar la posición de tubos para el inicio de colado. Los niveles de relleno de ben ser iguales en todas las celdas durante todo el proceso de colado.

Esta actividad se realiza colocando dos tubos tremie en cada celda definida por la pared exterior de los anillos prefabricados, vigas-guía verticales y la pared de la excavación.

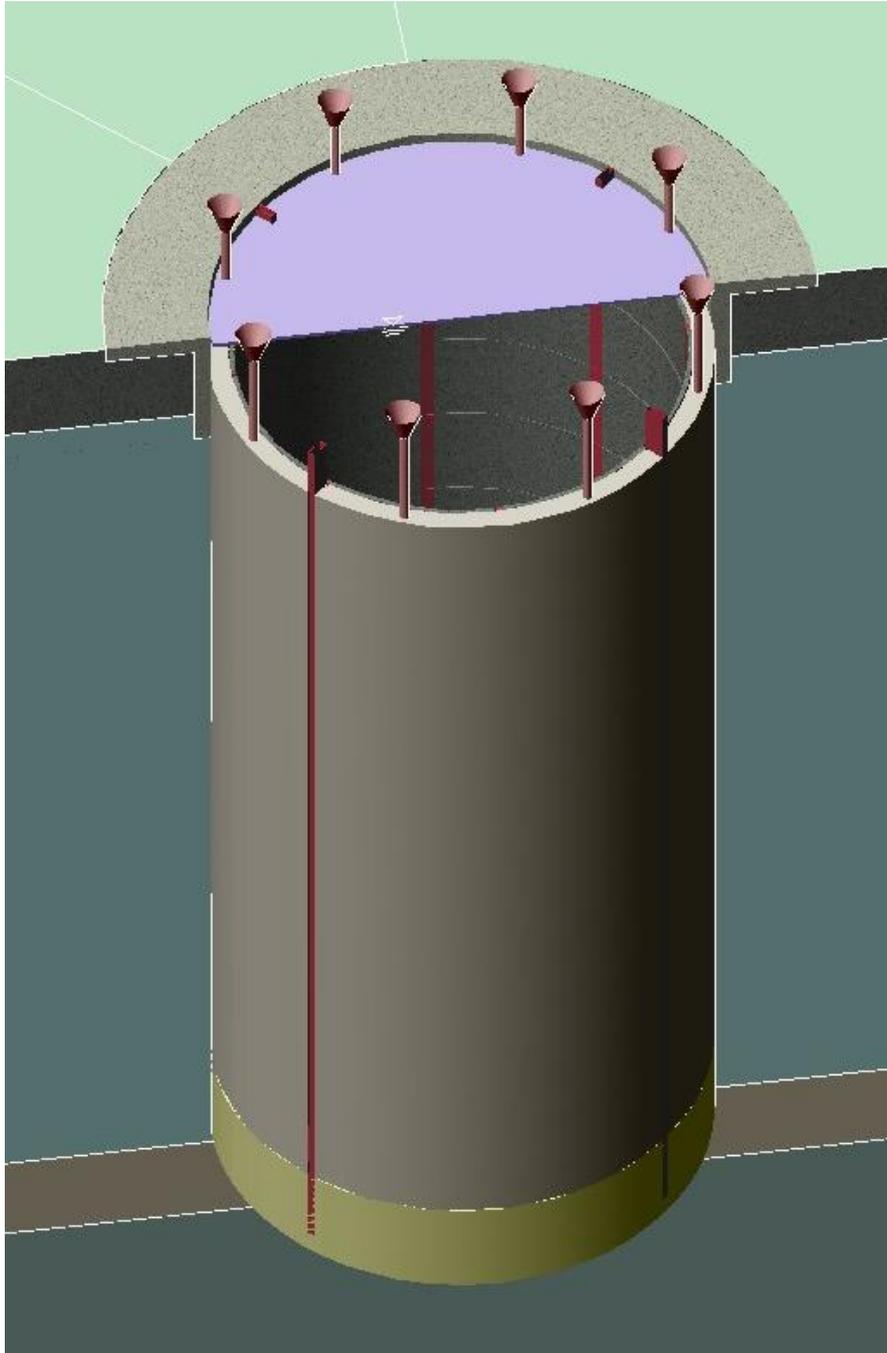


Figura 53. Colocación del relleno perimetral con el tubo tremie.

Durante la colocación del relleno perimetral los niveles del mortero-bentonita se mantienen uniformes e iguales en todas las celdas, para evitar las concentraciones de carga en los anillos prefabricados.

2.7.1 Descripción del relleno perimetral a base de mezcla mortero-bentonita

El material del relleno perimetral tiene una serie de propiedades que favorecen su colocación, el comportamiento estructural de los anillos tanto durante el proceso de colado como después de su fraguado. Durante el colado debe disponer de fluidez y del peso volumétrico suficientemente alto para desplazar los lodos bentoníticos. La adquisición de su resistencia inicial debe ser rápida para finalizar la presión del mismo mortero-bentonita a las paredes de los anillos por la diferencia de pesos entre el mortero y los lodos en el interior de la lumbrera. Después del relleno de la zanja perimetral y del fraguado del material de relleno, se obtiene un excelente revestimiento primario de la lumbrera que consiste de la losa de fondo primaria y el muro cilíndrico constituido por dos laminas concéntricas: el mortero-bentonita-cemento del relleno perimetral y el concreto reforzado de los anillos con el espesor total de 75cm. Se observa que los anillos prefabricados trabajan estructuralmente solos, únicamente en el intervalo desde el colado del relleno perimetral hasta la adquisición de resistencia inicial del mismo relleno.

2.7.2 Preparación de la mezcla de mortero-bentonita

El mortero a emplearse debe presentar una resistencia a compresión entre los 10 a 30 kg/cm².

El mezclado del mortero, considerando las especificaciones del Reglamento de Construcciones del Departamento del Distrito Federal (referencia xx) y los requerimientos establecidos por las normas ASTM C270 (referencia x) y las del International Building Code (IBC, referencia xii), debe cumplir con la siguiente dosificación:

- 1 parte de cemento Portland.
- De 1 1/4 partes a 2 1/2 partes de cal hidratada.
- 1/4 parte de bentonita.
- La relación volumétrica entre la arena y la suma de cementantes debe encontrarse entre 6 a 7.
- Debe emplearse la cantidad mínima de agua que dé como resultado un mortero fácilmente trabajable de revenimiento de 20cm.
- Por cada metro cubico de la mezcla debe aplicarse 1.0 kg de fibras sintéticas.
- Debe emplearse un aditivo impermeabilizante integral para morteros, a una razón del 2 al 4 % del peso del cemento empleado en la mezcla.

Antes de la incorporación del mortero se verificará, por medio de las pruebas de laboratorio establecidas en la norma NOM C 61 (referencia xiii), que la resistencia a la

compresión del mismo se encuentre dentro del intervalo de las resistencias especificadas.

2.7.3 Descripción de los materiales que constituyen el material mortero-bentonita

α) ARENA

La granulometría de la arena por emplearse en la elaboración de mortero debe cumplir con los valores de la siguiente tabla:

Malla	Porcentaje que pasa
3/8"	100
No. 4	95 al 100
No. 8	80 al 100
No. 16	50 al 85
No. 30	25 al 60
No. 50	10 al 30
No. 100	2 al 20
No. 200	4 al 6

Tabla 5. Definición de la granulometría de agregado pétreo para el mortero que se incorpora en los espacios anulares entre los anillos y la pared vertical de la excavación.

β) CEMENTO, FIBRAS SINTÉTICAS Y ADITIVO IMPERMEABILIZANTE

El cemento, las fibras sintéticas y aditivos impermeabilizantes son muy similares a los indicados para agregar mortero que se incorpora en los anillos en las zonas de paso de escudo.

2.7.4 El mezclado y colocación del mortero-bentonita

La consistencia del mortero se ajusta tratando de que alcance una fluidez mínima compatible con una fácil colocación (revenimiento de 20cm). Los materiales se mezclan mecánicamente en un recipiente no absorbente.

El mortero se coloca en su lugar de proyecto por medio de los tubos tremie.

2.8 Retiro de los lodos del interior de la lumbrera

Después del colado del relleno perimetral puede considerarse que se terminó con la construcción del revestimiento primario, y que la lumbrera dispone con la estabilidad del fondo y de las paredes contra la falla, y no es necesario tener lodos bentoníticos en el interior de la excavación.

Cuando el mortero-bentonita desarrolle los 10% y el concreto de la losa de fondo desarrolle los 50% de su resistencia de diseño, empieza el retiro de los lodos bentoníticos del interior de la lumbrera.

2.9 Construcción del revestimiento definitivo

- El revestimiento definitivo se diseña sin contar con la contribución del revestimiento primario en la resistencia a largo plazo por varias razones:
- La losa de fondo primaria es producto de una obra oculta donde es muy difícil o imposible de verificar la continuidad y calidad de materiales incorporados.
- El relleno perimetral tiene las mismas incógnitas que la losa de fondo primaria respecto a la continuidad y calidad de materiales.
- Los anillos perimetrales disponen de varias partes de acero estructural, como son las conexiones, cuya corrosión podría afectar a la estabilidad de la lumbrera a largo plazo.
- Las normas y especificaciones para el diseño y construcción de las estructuras de ingeniería sanitaria o de medio ambiente para el concreto reforzado (referencia xvii) requieren la calidad uniforme con pequeñas desviaciones que puede satisfacerse solamente cuando la obra se realiza expuesta a simple vista. Algunos de los elementos de calidad que es difícil de cumplir con las obras ocultas son: máxima relación de agua-cemento de 0.5, la impermeabilidad requerida de concreto, la resistencia al ataque químico, tolerancias de geometría como son espesores, homogeneidad, ausencia de zonas contaminadas, burbujas, control de juntas de colado, de juntas flexibles, etc. De hecho, no existen algunas normas que garantizan la calidad de las obras ocultas.

Es importante recordar que en los casos de emergencia, y en las obras planeadas, a veces es inevitable recurrir a las obras ocultas como son las inyecciones, restitución de suelo en grandes profundidades, colados con tubo tremie, etc., con la dificultad de determinar las cantidades de los materiales y costos de la obra que pueden exceder varias veces los presupuestos iniciales.

Con el proyecto que contempla disminuir elementos estructurales realizados con las obras ocultas y trata de maximizar la cantidad de elementos estructurales de obra que se realizan a simple vista, el índice de problemas, fallas o el exceso de costos y tiempos de construcción es menor.

Por ejemplo, la eliminación del bloque de mejoramiento de suelo en las zonas de salida y entrada del túnel representa el significativo incremento de seguridad, rapidez y reducción de costos de la obra, implementando la misma función a las zonas de mortero en el revestimiento primario y definitivo.

2.9.1 Construcción de la losa de fondo definitiva y de la parte inferior de los muros hasta el nivel inferior de mortero del portal

Después del retiro del lodo del interior de la lumbrera empieza la construcción del revestimiento definitivo de la lumbrera incluyendo los portales de entrada y salida de escudo. Las actividades se realizan de acuerdo con la siguiente secuencia:

- Colocación de la parte inferior e superior de la estructura metálica de soporte de escudo (ver figuras 54 Y 55).



Figura 54. Estructura metálica de soporte de sello.

Esta estructura sirve de soporte de escudo durante la maniobra de entrada, así como para la fijación del sello perimetral del escudo con elastómero.

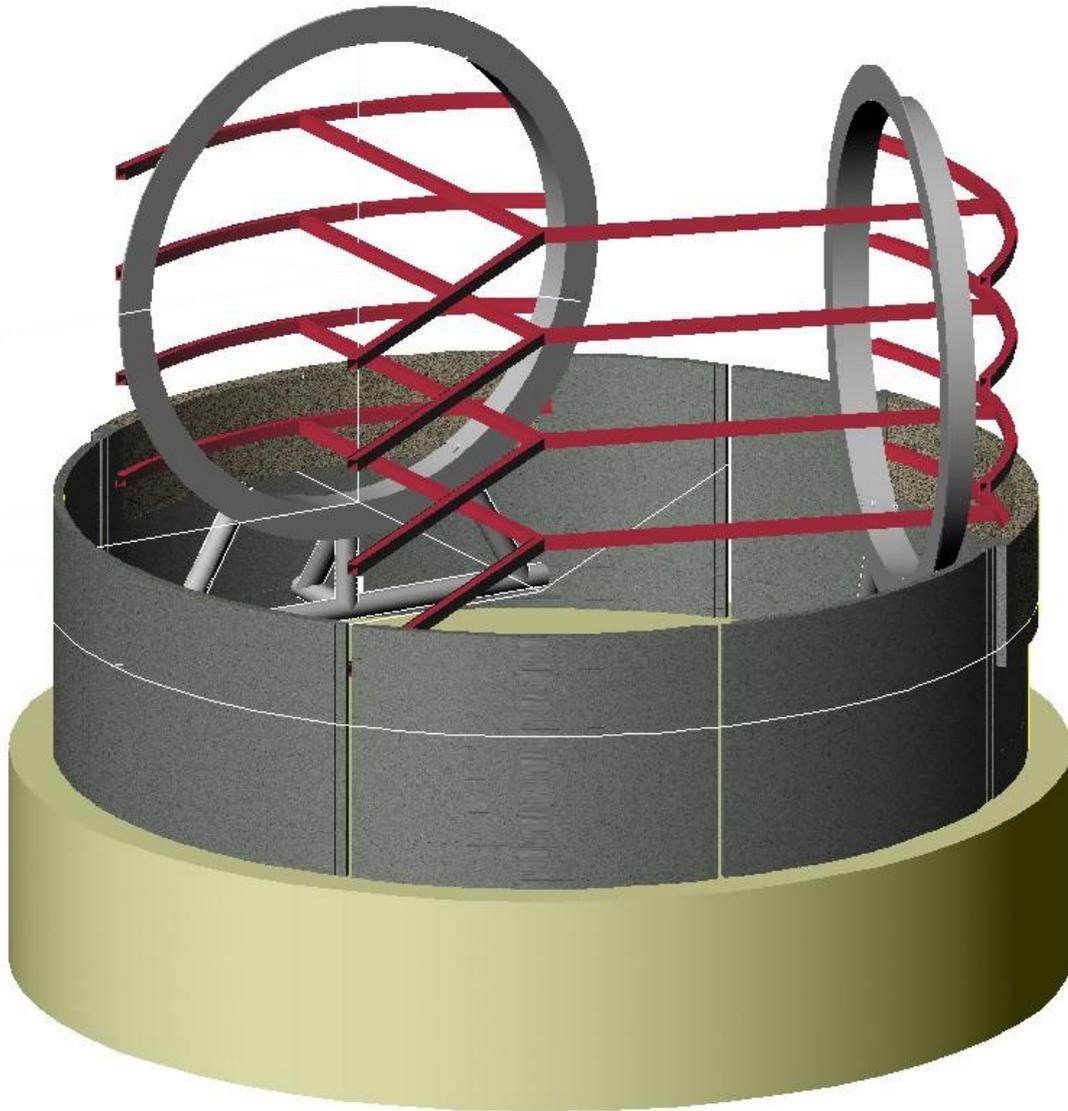


Figura 55. Las estructuras metálicas de soporte de escudo y sello en el interior de la lumbrera.

Anteriormente, durante las maniobras de entrada y salida de escudo, el peso total de escudo se concentraba en una región o área muy pequeña de concreto. En algunos casos, el peso de escudo combinado con la fricción han causado el rompimiento de concreto en la región de apoyo de escudo y dieron lugar a extrusión de grandes cantidades de arcilla al interior de la lumbrera que entraba en forma de chorro de agua, aún con previa restitución del bloque de suelo (“el mejoramiento”).

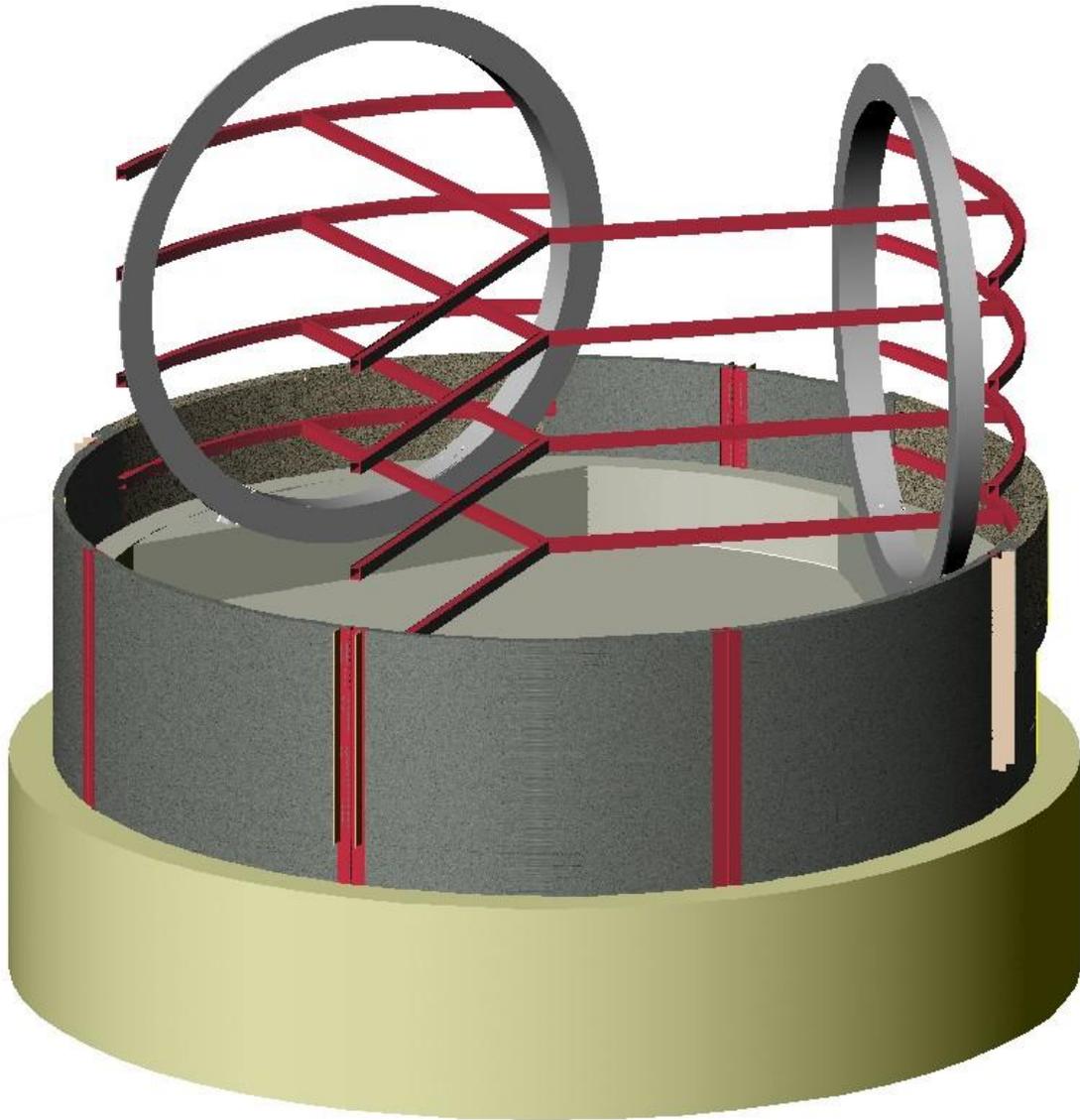


Figura 56. Construcción de la losa de fondo definitiva y del muro definitivo hasta el nivel inferior de las zonas de mortero en los anillos prefabricados.

- Colocación del acero de refuerzo de la losa del fondo y de la zona inferior de los muros definitivos, del acero de refuerzo de los portales de entrada y salida, y colado de la losa de fondo y de los muros cilíndricos y de portal hasta el nivel inferior de las zonas de mortero (figura 56).

Es importante notar que el colado de los muros verticales que forman partes de los portales donde se combina concreto reforzado con mortero se realiza por etapas.

2.9.2 Construcción del revestimiento definitivo de la lumbrera fuera de la zona de los portales y construcción del portal con el mortero y concreto reforzado

La parte más compleja de construcción del revestimiento definitivo de la lumbrera es la zona de los portales que consiste de dos partes: de concreto reforzado y de mortero.

Primero se construye la parte de concreto reforzado y después se cuela el mortero en el interior de los portales.

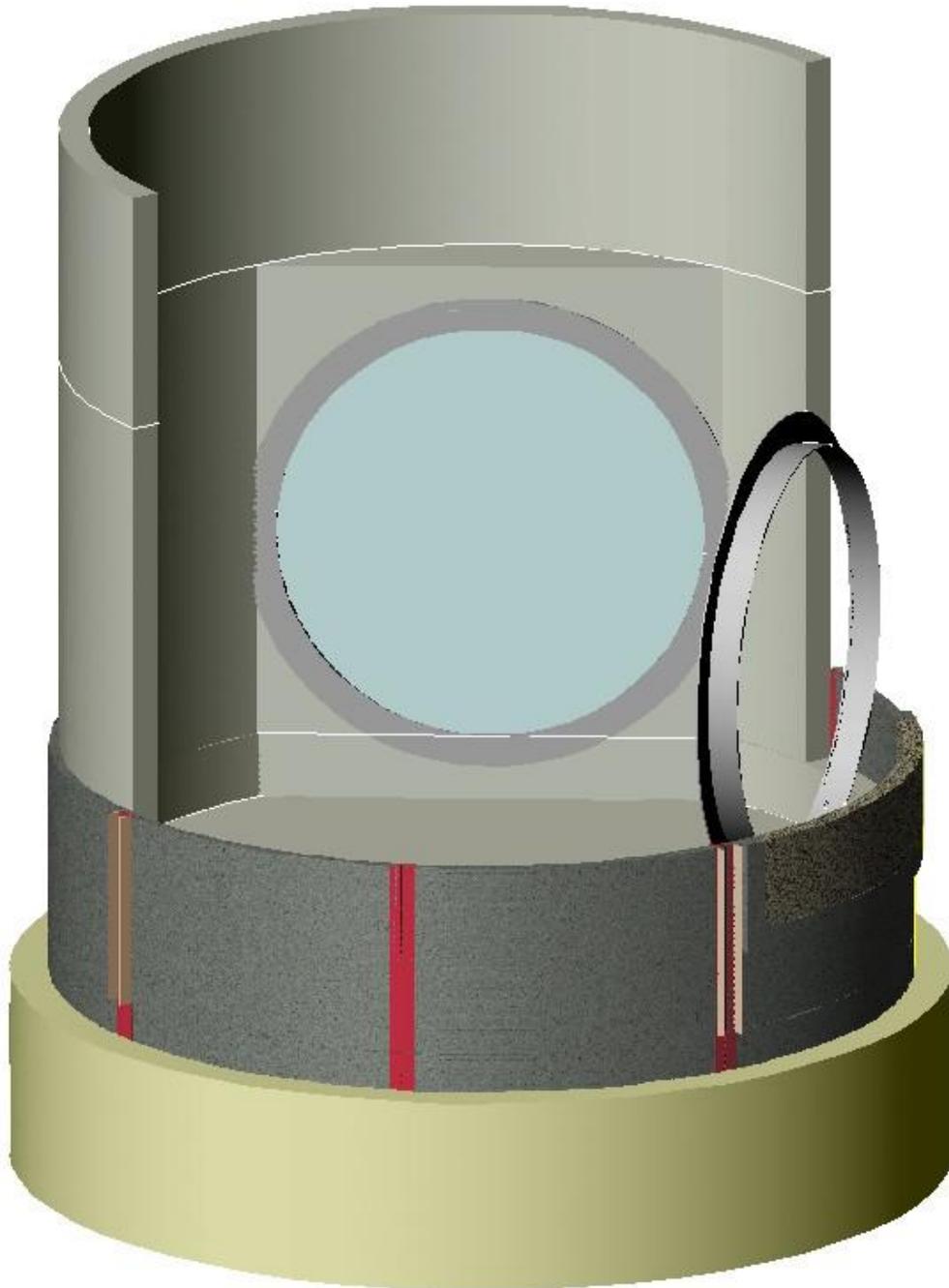


Figura 57. Revestimiento definitivo de concreto reforzado en la zona de los portales. También, se nota un portal relleno con el mortero. El revestimiento definitivo en forma del muro cilíndrico de concreto reforzado continúa desde los portales hasta la superficie de suelo

El mortero de los portales se cuela por etapas desde abajo hacia arriba: cuando el nivel de mortero alcance la cara inferior del soporte metálico de mortero de anillos y alcance los 30% de la resistencia del diseño el mismo soporte metálico se retira y se sigue con el colado del siguiente nivel de mortero hasta el próximo nivel de la cara inferior del

soporte metálico del mortero. Esta secuencia se repite hasta llenar completamente el interior del portal con el mortero (figura 57).

3 Análisis geotécnicos de estabilidad y de desplazamientos

Debido a la complejidad de las condiciones del sitio de proyecto y las importantes diferencias entre las propiedades mecánicas de los suelos supuestas y reales, ninguna teoría de la estabilidad puede ser más que un medio de obtener una estimación aproximada de la resistencia disponible contra la falla. Si un método de cálculo es simple, fácilmente podemos juzgar las consecuencias prácticas de diversas desviaciones de las suposiciones básicas, y así, modificar nuestras decisiones de manera consecuente (referencia vii, art. 55).

Los análisis geotécnicos que se realizan en las lumbreras se refieren a los problemas de estabilidad relacionados con la falla de paredes y del fondo de la excavación (referencia iii, vii, viii, ix), con la falla por extrusión (referencia xiv), así como con desplazamientos durante la construcción, y a largo plazo incluyendo los efectos del hundimiento regional (referencia viii) y de los fuertes sismos que periódicamente azotan al Valle de México (referencia viii).

El ambiente de subsuelo de la obra se caracteriza por materiales arcillosos lacustres de origen volcánico (referencia i) de muy baja resistencia al esfuerzo cortante, de muy alta compresibilidad, muy baja permeabilidad, y muy alta sensibilidad, donde la relación de resistencias en estado inalterado y alterado es del orden de 10, similar al fenómeno de los "quick clays" (referencia viii).

El módulo de cortante dinámico para el análisis sísmico presenta variaciones en función de la magnitud de distorsión angular de las oscilaciones sísmicas esperadas, y sigue la ley cualitativa de la proporcionalidad inversa: mayor distorsión produce menor módulo de cortante siendo el límite inferior cuando el suelo entra en el estado de equilibrio plástico (referencia viii). El subsuelo se encuentra saturado desde las pequeñas profundidades hacia las profundidades de influencia significativa del proyecto. Esto significa, que para las cargas dinámicas o de corta duración no se presentan deformaciones volumétricas (referencia viii).

La erosión de materiales superficiales heterogéneos en conjunto con el hundimiento regional puede causar los daños en las conexiones con las estructuras e instalaciones que se conectan a la lumbrera en su parte superior.

El abatimiento de presiones de agua en las series de acuíferos conectados o separados es la fuente del hundimiento regional cuyas velocidades cambian con la profundidad, siendo los hundimientos máximos en la superficie de suelo, con la tendencia de disminuir con la profundidad (referencia viii). Las magnitudes del hundimiento regional dependen de la política de extracción de agua del subsuelo, que es difícil de predecir a largo plazo, ya que básicamente depende de la demanda de agua, que tiene un constante crecimiento. En el proyecto de las lumbreras, que se construyen para una operación a largo plazo, el hundimiento regional presenta problemas de desplazamientos

diferenciales básicamente entre la lumbrera y su entorno como es el subsuelo y todo lo asociado al mismo, como son estructuras e instalaciones vecinas: túneles, tubería superficial, edificios, otras obras subterráneas como es el Metro, puentes, etc.

3.1 Suposiciones de trabajo en los análisis geotécnicos y de interacción suelo-estructura

Los puntos de partida de los análisis geotécnicos son por un lado el perfil estratigráfico y físico de subsuelo y por otro los requerimientos del proyecto geométrico y estructural, con la finalidad de llegar a un proyecto ejecutable dentro de razonables márgenes de seguridad y servicio.

El caso común del perfil estratigráfico se refiere a la Zona de Lago del Valle de México caracterizado por una capa superficial de rellenos heterogéneos (CE), subyacida por la Formación Arcillosa Superior (FAS), Primera Capa Dura (CD), formación arcillosa inferior (FAI) y depósitos profundos (DP) (figura 2).

El perfil físico se indica en el capítulo 1 y las propiedades se resumen en la siguiente tabla.

UNIDAD ESTRATIGRÁFICA	ESPESOR APROX. (m)	PESO VOL. γ_m (t/m ³)	c=cohesión (t/m ²)	ϕ (°)	m_v (cm ² /kg)	k (cm/s)	ν	μ (kg/cm ²)
ES	1-6	1.5-1.6	2-4	0-30	0.05	10^{-2} - 10^{-1}	0.3	520
FAI	27-32	1.1-1.2	2.0-2.5	0	0.1	10^{-5} - 10^{-8}	0.5	520
CD	1-5	1.5-1.6	10-15	30-35	0.001	10^{-3} - 10^{-1}	0.3	5000
FAS	10-15	1.1-1.3	3-5	0	0.02	10^{-5} - 10^{-8}	0.5	520
DP	Muy grande	1.5-1.8	20 ->	30-45	0.0004	Muy variable	0.35-0.5	>2000

c = cohesión, t/m²,

ϕ = ángulo de fricción interna (°),

m_v = módulo de compresibilidad, cm²/kg

k = coeficiente de permeabilidad, cm/s

ν = relación de Poisson,

μ = modulo de cortante sísmico, kg/cm²,

Los requerimientos del proyecto geométrico y estructural-geotécnico son: construir una estructura cilíndrica de concreto reforzado con el propósito de facilitar la obra del túnel, y para la conducción de aguas negras, pluviales y combinadas desde los conductos superficiales al túnel. En plantas de bombeo, se agregan otros requerimientos como es el soporte de equipo de bombeo, de tanque de carga, rejillas, etc.

3.2 Análisis a corto plazo siguiendo las situaciones críticas de la secuencia de construcción de la lumbrera

Durante el proceso de construcción de las lumbreras se presentan instantes críticos cuando puede presentarse una falla de suelo, que algunas veces han ocurrido en el transcurso de las obras del Drenaje Profundo y obras similares.

Los instantes críticos son:

- La estabilidad de la trinchera perimetral que se realiza con la almeja guiada, restituyendo el suelo natural con los lodos bentoníticos (figura 32, 58, 59).
- Estabilidad de fondo por el colapso de suelo por presentarse el mecanismo de falla por el exceso de capacidad de carga en el suelo vecino a la excavación (figuras 62 y 63).
- Estabilidad de fondo de la excavación por la supresión hidráulica en un estrato permeable por debajo del nivel de fondo de la excavación (figura 33, 65).
- Fallas por extrusión en los espacios entre escudo y muro de lumbrera donde el suelo de muy alta sensibilidad, perteneciente a la FAS, puede sufrir una falla progresiva por la falta de confinamiento, transformarse en líquido y entrar fluyendo al interior de la lumbrera.

En los siguientes capítulos se presentan los métodos analíticos de evaluación de los factores de seguridad referidos a los tipos de falla mencionados.

3.2.1 Estabilidad de la trinchera perimetral

α) Estabilidad de la trinchera sin lodos.

En todo tipo de taludes verticales en suelo cohesivo en la zona superior se presentan esfuerzos normales en el sentido horizontal por tensión proporcionales a la altura del talud (figura 58).

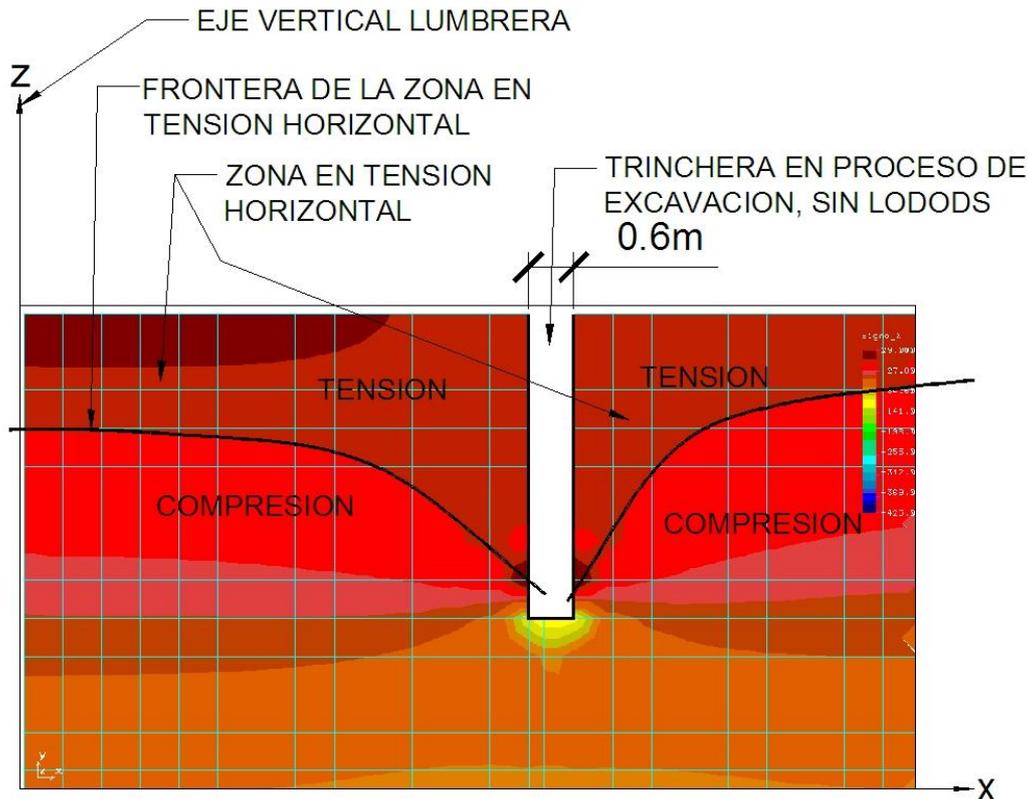


Figura 58. Ilustración de la distribución de los esfuerzos normales en el sentido horizontal (σ_x) en los lados de una excavación de trinchera perimetral circular calculada como un problema axialmente simétrico donde el eje del problema coincide con el eje de la lumbrera. No se toma en cuenta la influencia de la resistencia de suelo. Unidades en t/m^2 .

Cuando la altura crece los esfuerzos horizontales normales por tensión se incrementarán hasta el valor de la resistencia y se formarán las grietas por tensión paralelas al plano vertical de talud.

Las grietas verticales pueden llenarse de agua que produce la presión hidrostática induciendo el fenómeno de cuñas hidráulicas.

La altura crítica de talud vertical con grietas verticales (referencia vii, art. 57.) con y sin agua se presenta en la figura 59.

H_c = Altura crítica del talud vertical ($\phi=0$, $C>0$),

ϕ = Ángulo de fricción interna del suelo que constituye talud de la excavación de la trinchera, en el caso de la FAI, igual a $\sim 0.0^\circ$.

c = Parámetro de resistencia a la cohesión del suelo que constituye talud de la excavación de la trinchera, en el caso de la FAI, igual a $\sim 2.0 t/m^2$.

W = Peso del suelo limitado por los puntos 1-2-4-5, con el ancho unitario, perpendicular al plano de dibujo.

C = Fuerza resistente debida a la cohesión a lo largo de la superficie de deslizamiento entre los puntos 1-2.

F = Fuerza normal, perpendicular al plano de deslizamiento 1-2 que hace equilibrio con las \vec{C} y \vec{W} .

γ = Peso volumétrico del suelo.

Para el caso de ausencia de grietas por tensión, la altura crítica, H_c , es (referencia vii, art. 57. Expr. [2a], p. 153):

$$H_c = 4 \frac{c}{\gamma} \quad (1)$$

Para el caso con grietas por tensión sin agua, la altura crítica, H_c , es (referencia vii, art. 57. Expr. [5], p. 154):

$$H_{c1} = 2.67 \frac{c}{\gamma} \quad (2)$$

Para el caso con grietas por tensión con agua, la altura crítica, H_c , es:

$$H_{c2} \ll 2.67 \frac{c}{\gamma} \quad (3)$$

Por ejemplo, las alturas críticas para los casos indicados se muestran en la tabla 6.

CASO	c t/m^2	γ t/m^3	H_c m	factor de seguridad FS	profundidad segura de la trinchera FS/H_c m
SIN GRIETAS POR TENSION	2.00	1.20	6.67	2.00	3.33
CON GRIETAS POR TENSION	2.00	1.20	4.45	2.00	2.23
CON GRIETAS POR TENSION LLENAS DE AGUA	2.00	1.20	$\ll 4.45$	$\ll 2.00$	$\ll 2.23$

Tabla 6. Profundidades críticas de la trinchera perimetral excavada sin lodos bentoníticos

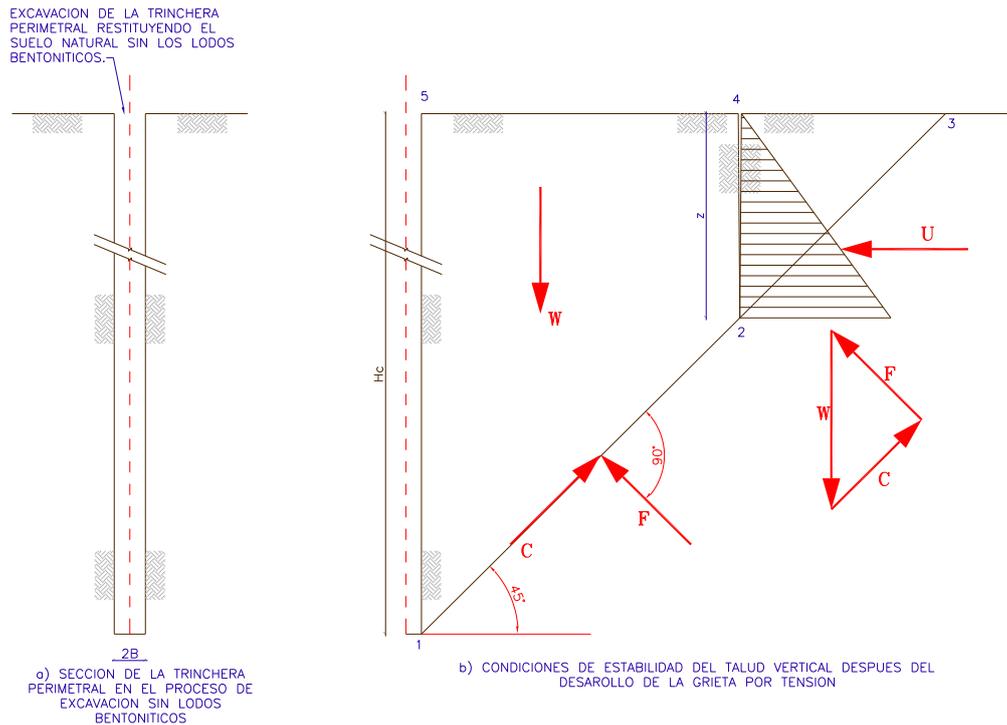


Figura 59. Situación de estabilidad de una trinchera perimetral sin lodos en el subsuelo del tipo FAS

En el caso de la excavación de trincheras en seco sin lodos, también pueden provocarse el secado de las arcillas lacustres con un muy alto contenido de humedad y provocar fuerte contracción, agrietamientos y finalmente la pulverización.

Puede concluirse que es recomendable utilizar los lodos bentoníticos como estabilizador y sellador de los taludes verticales que se forman en los lados de las paredes de la trinchera.

β) Estabilidad de la trinchera con lodos bentoníticos.

Los lodos aportan los beneficios de confinamiento y sellado de las paredes de la trinchera perimetral.

Los empujes hidrostáticos de los lodos proporcionan el efecto de la estabilización a la trinchera. El efecto de sello en las paredes verticales de la excavación forma una frontera tipo membrana impermeable entre los medios con dos tipos de presiones.

La distribución conceptual de los esfuerzos verticales en la masa de suelo y de las presiones de los lodos se muestra en la figura 60.

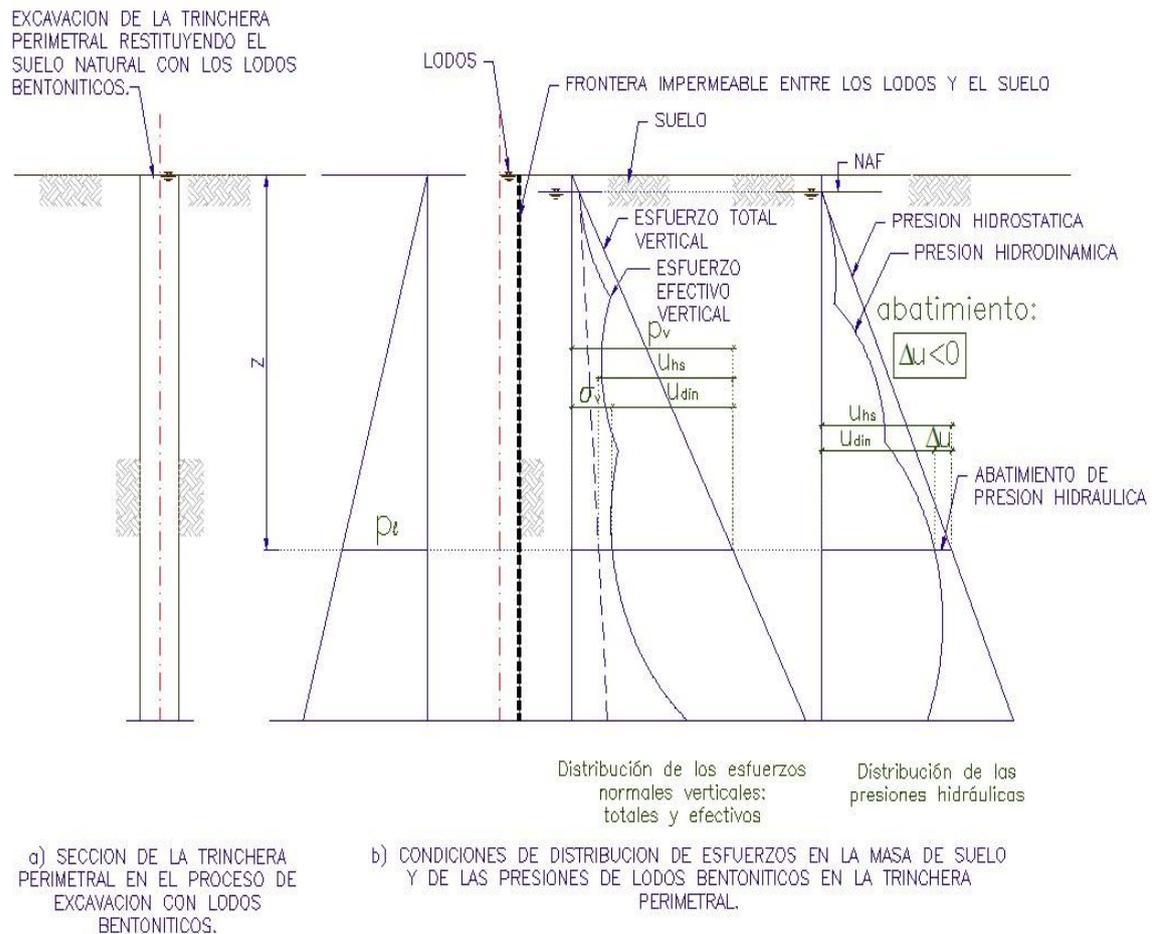


Figura 60. Distribución de los esfuerzos verticales y de las presiones hidráulicas en la masa de suelo, así como de las presiones hidrostáticas de los lodos bentoníticos en la trinchera perimetral.

La presión total hidrostática de los lodos con el sentido horizontal radial es:

p_l = presiones hidrostáticas de los lodos en la trinchera perimetral.

γ_l = peso volumétrico de los lodos $\approx 1.05 \text{ t/m}^3$.

z = profundidad a partir de la superficie de los lodos, considerando que los niveles de la superficie de suelo y de los lodos es aproximadamente igual.

$$p_l = \gamma_l \cdot z \quad (4)$$

En la masa de suelo las presiones y esfuerzos verticales son:

$p_v = \gamma_m \cdot z = \text{const.}$ = esfuerzos verticales totales en la masa de suelo que no cambian en función de los cambios de las presiones de agua subterránea, t/m^2 .

γ_m = peso volumétrico total de suelo, t/m^3 .

u_{hs} = presión hidrostática de agua subterránea, t/m^2 .

Δu = abatimiento de las presiones hidrostáticas, t/m^2 .

$$u_{din} = u_{hs} - \Delta u = \text{presión hidrodinámica de agua subterránea, t/m}^2.$$

$$\sigma_v = \text{esfuerzos verticales efectivos en la masa de suelo, t/m}^2.$$

$$\sigma_v = p_v - u_{din} = \gamma_m \cdot z - u_{din} \quad (5)$$

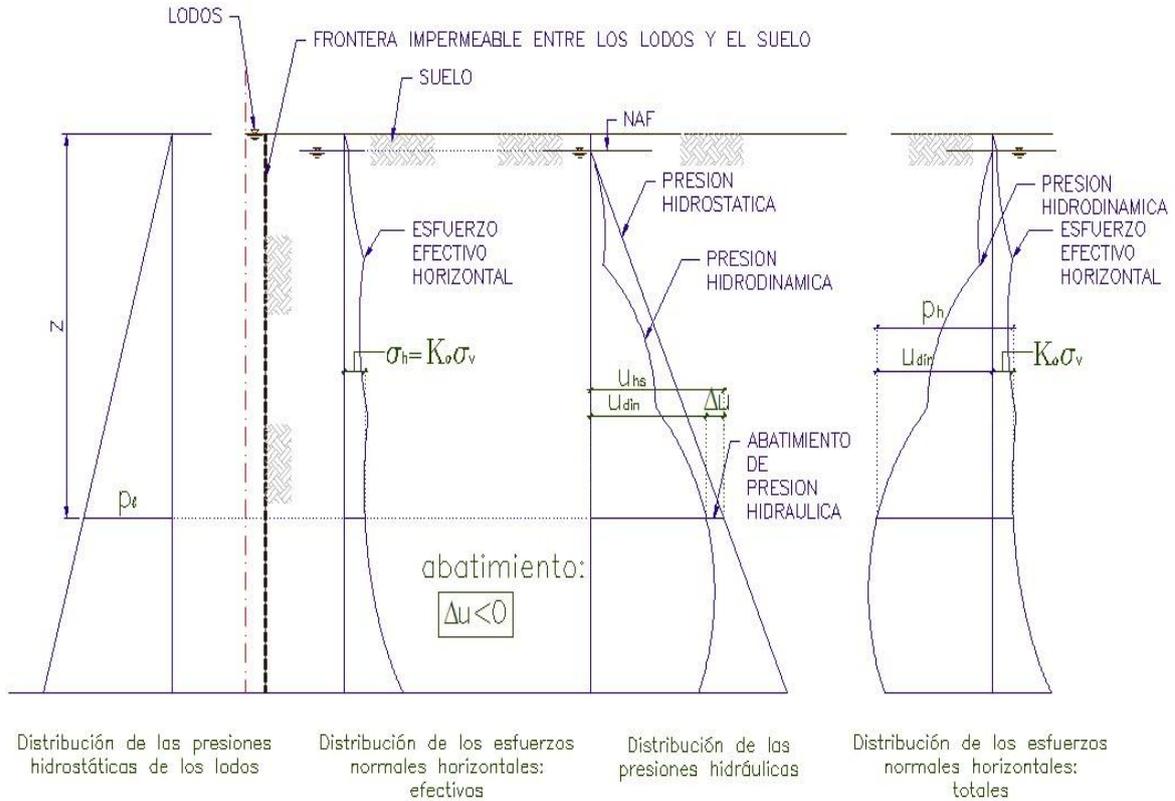


Figura 61. Distribución de los esfuerzos horizontales efectivos y totales en la masa de suelo.

Las presiones y esfuerzos horizontales en el subsuelo se indican en la figura 61.

$$\sigma_h = \text{esfuerzos horizontales efectivos en la masa de suelo, t/m}^2.$$

K_o = relación de reposo entre los esfuerzos horizontales y verticales efectivos.

Para las arcillas de la FAI el K_o aproximado se encuentra en el intervalo:

$$K_o \cong 0.4 \sim 0.6$$

De esta manera los esfuerzos efectivos horizontales de reposo son:

$$\sigma_h = K_o \cdot \sigma_v = K_o \cdot (p_v - u_{din}) = K_o \cdot (\gamma_m \cdot z - u_{din}) \quad (6)$$

Los esfuerzos totales horizontales que se contrarrestan con las presiones de lodos son:

$$p_h = \sigma_h + u_{din} = K_o \cdot (\gamma_m \cdot z - u_{din}) + u_{din} \quad (7)$$

Finalmente:

$$p_h = K_o \cdot \gamma_m \cdot z + u_{din} \cdot (1 - K_o) \quad (8)$$

El siguiente ejemplo ilustra la diferencia entre las presiones de lodos y presiones horizontales de suelo:

$$Z = 6.0m,$$

$$p_v = \gamma_m \cdot z = \text{const.} = 1.1 \cdot 6.0 = 6.60 \text{ t/m}^2.$$

$$\gamma_m = 1.1 \text{ t/m}^3.$$

$$u_{hs} = 4.0 \text{ t/m}^2.$$

$$\Delta u = 1.5 \text{ t/m}^2.$$

$$u_{din} = u_{hs} - \Delta u = 4.0 - 1.5 = 2.5 \text{ t/m}^2.$$

$$\sigma_v = p_v - u_{din} = \gamma_m \cdot z - u_{din}$$

$$\sigma_v = 6.6 - 2.5 = 4.1 \text{ t/m}^2.$$

$$K_o = 0.5$$

Para los datos indicados los esfuerzos totales en el suelo en el sentido horizontal, en la profundidad de 6.0m, son:

$$p_h = K_o \cdot \gamma_m \cdot z + u_{din} \cdot (1 - K_o) = 3.30 + 2.5(1.0 - 0.5) = 4.55 \frac{t}{m^2}$$

En la misma profundidad, la presión de lodos es igual a:

$$p_l = \gamma_l \cdot z = 1.05 \cdot 6.0 = 6.3 \frac{t}{m^2}$$

$$\Delta p = p_l - p_h = 6.30 - 4.55 = 1.75 \frac{t}{m^2}$$

Puede notarse la diferencia de presiones del orden de **1.75t/m²**, entre las presiones de lodo y esfuerzos totales de suelo en el sentido horizontal, a la profundidad de 6.0m. El efecto son las **expansiones radiales** de suelo en el sentido horizontal.

Puede notarse, para un abatimiento importante de presiones de agua subterránea, que las presiones totales en el sentido horizontal pueden ser menores que las presiones horizontales de lodos en la trinchera.

En el caso de la trinchera o excavación circular, el exceso de las presiones de lodos sobre las presiones totales de suelo en el sentido horizontal provoca pequeños incrementos de diámetro de la excavación y en casos extremos se formaron grietas radiales provocando el escape parcial de los lodos del interior de la excavación. Para contrarrestar este efecto se implementan las pantallas perimetrales a la excavación, impermeables con una pequeña resistencia a la tensión, construidas en paneles aislados.

La experiencia en varias lumbreras demuestra la eficacia de los lodos en la estabilización contra la falla de las paredes verticales de la excavación.

En las excavaciones de la trinchera perimetral, frecuentemente, los impactos provocados por el descenso/ascenso de la almeja alteran la estabilidad de las paredes verticales de excavación de la trinchera estabilizada con lodos, provocando los desprendimientos locales de suelo, proyecciones de bloques de suelo hacia la excavación y derrumbe de materiales sin cohesión como son arenas y gravas.

3.2.2 Estabilidad del fondo de la excavación

En algunas excavaciones para lumbreras, se construye una pantalla perimetral para estabilizar las paredes. En este caso, las paredes son generalmente estables pero toma importancia la posibilidad de falla de fondo. El mecanismo de falla de fondo también puede presentarse al aplicar el método de anillos sin pantalla perimetral, si se llega a abatir el nivel de lodo antes de colar la losa de fondo.

En la mayoría de los casos de lumbreras de Drenaje Profundo el nivel de fondo se encuentra muy cerca de la Primera Capa Dura (CD). Esta unidad estratigráfica se caracteriza por los suelos de muy alta resistencia al esfuerzo cortante, de muy baja compresibilidad y por su alta permeabilidad ($k=10^{-3}\sim 10^{-4}cm/s$, referencia i). Esta unidad impide el cruce de alguna superficie de falla de fondo, pero por su alta permeabilidad y altas presiones hidráulicas, puede provocar la falla de fondo por supresión.

En los siguientes subcapítulos se analizan varios mecanismos de falla de fondo y algunas combinaciones entre ellos.

α) Estabilidad de la excavación por el exceso de capacidad de carga, donde las arcillas se extienden por debajo del fondo a una gran profundidad.

Se considera el caso de lumbrera situada en toda su profundidad en la FAI (figura 62). El suelo es puramente cohesivo. El revestimiento de la lumbrera impide la falla de las paredes verticales de la excavación (líneas 2-7 y 4-5). La falla de fondo puede ocurrir por el exceso de la sobrecarga debida al peso de suelo al lado de la excavación (línea 1-2). La fuerza resistente al lado de la superficie vertical 1-6, disminuye la acción del peso del suelo (referencia vii, art. 69.). La capacidad de carga de la superficie en el nivel de fondo (línea 1-2) al lado de la pared es:

q_D = la capacidad de carga por la unidad de superficie de la franja al lado del fondo de la excavación,

c = cohesión, la resistencia al esfuerzo cortante de arcillas FAS en condiciones rápidas.

$$q_D = 5.7c \quad (9)$$

Puede notarse que q_D es independiente del ancho B (figura 62).

Puede deducirse que la profundidad crítica (H_c) de la excavación, con el factor de seguridad igual a uno es:

$$H_c = \frac{5.7 \cdot c}{\gamma_m - \frac{c}{\sqrt{2}B_1}} \quad (14)$$

Para FAI, con $\gamma_m = 1.15 \text{ t/m}^3$, $c = 2.0 \text{ t/m}^2$ y el radio de la excavación de 7.2m , la altura crítica de la excavación ademada, (H_c) es:

$$H_c = \frac{5.7 \cdot 2.0}{1.15 - \frac{2.0}{\sqrt{2} \cdot 7.2}} \approx 12.0\text{m}$$

En este caso límite, hipotéticamente, la superficie de deslizamiento se extiende hasta la profundidad de (figura 62):

$$H_c + \sqrt{2}B_1 = 12.0 + \sqrt{2} \cdot 7.2 = 22.0\text{m}$$

β) Estabilidad de la excavación por exceder la capacidad de carga, cuando la primera Capa Dura (ED) se encuentra en la profundidad cercana del fondo de la excavación (figura 63).

Se considera el caso de lumbrera situada en toda su profundidad en la FAI (figura 63). El ángulo de fricción interna ϕ de suelo es igual a cero. El revestimiento de la lumbrera impide la falla de las paredes verticales de la excavación (líneas 2-7 y 4-8). La falla de fondo puede ocurrir por el exceso de la sobrecarga debida al peso de suelo al lado de la excavación (superficie 1-2). La fuerza resistente a lo largo de la superficie vertical 1-6 disminuye la acción del peso del suelo. La capacidad de carga de la superficie en el nivel de fondo al lado de la pared (superficie 1-2) es:

q_D = capacidad de carga por la unidad de superficie de la franja al lado del fondo de la excavación,

c = cohesión, la resistencia al esfuerzo cortante de arcillas FAS en condiciones rápidas.

$$q_D = 5.7c$$

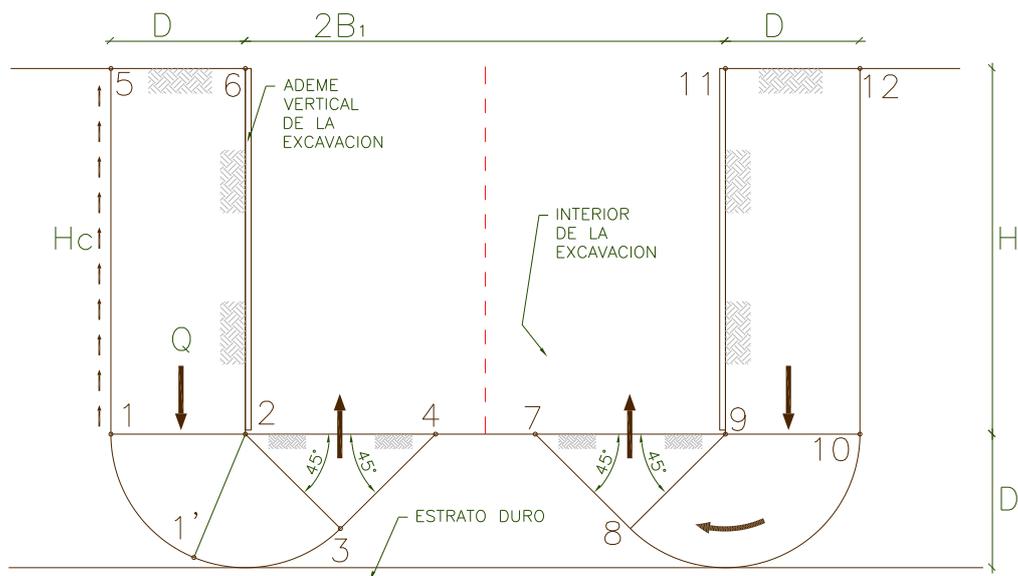
Puede notarse que q_D es independiente del ancho B (figura 63). La máxima profundidad de la superficie de deslizamiento 1-1'-3-4 es la profundidad entre el fondo y la superficie de la capa dura, D (referencia vii, art. 69).

El factor de seguridad puede expresarse como la relación entre la resistencia y la acción que la tiende a vencer:

Q = la carga actuante debida al peso de suelo 1-2-5-6 disminuida por la resistencia por la superficie 1-5.

Q_D = capacidad de carga por falla en la superficie 1-2.

FS = Factor de seguridad.



MECANISMO DE LA FALLA DE FONDO EN SUELOS ARCILLOSOS, CON $\phi=0$ Y $c, \gamma_m \approx \text{const.}$, EN LA CERCANIA DEL ESTRATO DURO

Figura 63. Falla de fondo en arcillas de la FAI en la cercanía de la primera capa dura ED.

$$Q = \gamma_m \cdot H \cdot D - H \cdot c$$

$$Q_D = 5.7 \cdot c \cdot D$$

$$FS = \frac{Q_D}{Q} = \frac{5.7 \cdot c \cdot D}{\gamma_m \cdot H \cdot D - H \cdot c} = \frac{1}{H} \cdot \frac{5.7 \cdot c \cdot D}{\gamma_m \cdot D - c}$$

$$FS = \frac{1}{H} \cdot \frac{5.7 \cdot c}{\gamma_m - \frac{c}{D}} \quad (15)$$

Puede deducirse que la profundidad crítica (H_c) de la excavación, con el factor de seguridad igual a uno es:

$$H_c = \frac{5.7 \cdot c}{\gamma_m - \frac{c}{D}} \quad (16)$$

Para FAI, con $\gamma_m = 1.15 \text{ t/m}^3$, $c = 2.0 \text{ t/m}^2$ y la distancia D variable, la altura crítica de la excavación ademada, (H_c , m) es:

$$H_c = \frac{5.7 \cdot 2.0}{1.15 - \frac{2.0}{D}} = \frac{11.4}{1.15 - \frac{2.0}{D}}$$

Puede notarse que la profundidad crítica (H_c) de la excavación, tiene una relación hiperbólica con la profundidad D (figura 64). En el ejemplo puede notarse que para la

profundidad $D \leq 1.74m$, la falla de fondo no es posible y que para las profundidades $D > 1.74m$, la profundidad crítica rápidamente baja de valores muy altos.

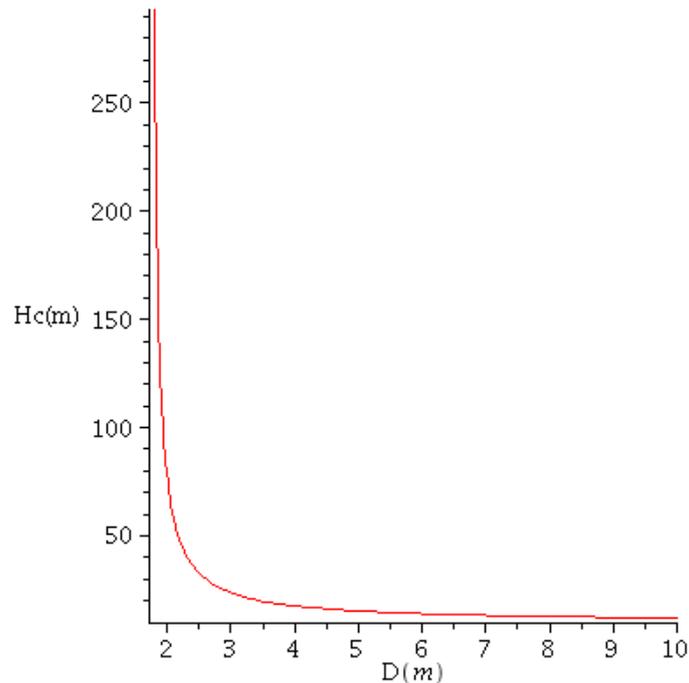


Figura 64. La altura crítica de la excavación (H_c) en función de la profundidad de la superficie de la primera capa dura por debajo del fondo de la excavación (D).

Por ejemplo, la lumbrera L-7 del Interceptor Oriente de la Ciudad de México, tiene un $D \cong 0.7m$. Para esta diferencia de profundidades entre el fondo de la excavación y la superficie de la Primera Capa Dura, puede decirse que la falla del fondo de la excavación por el exceso de capacidad de carga no es probable.

γ) Resultados del estudio paramétrico de la estabilidad de fondo de la excavación

Los resultados del estudio paramétrico de los factores de seguridad (FS) contra la falla de fondo (referencia **xv**) en función del nivel de lodos por debajo del nivel de brocal, resistencia al esfuerzo cortante no drenada (c_u) y presencia o ausencia de las pantallas o muros perimetrales de mortero plástico, indican los siguiente (ilustración 1):

- Con el descenso de nivel de lodos se disminuye el FS .
- La presencia de la pantalla perimetral significativamente incrementa el FS .

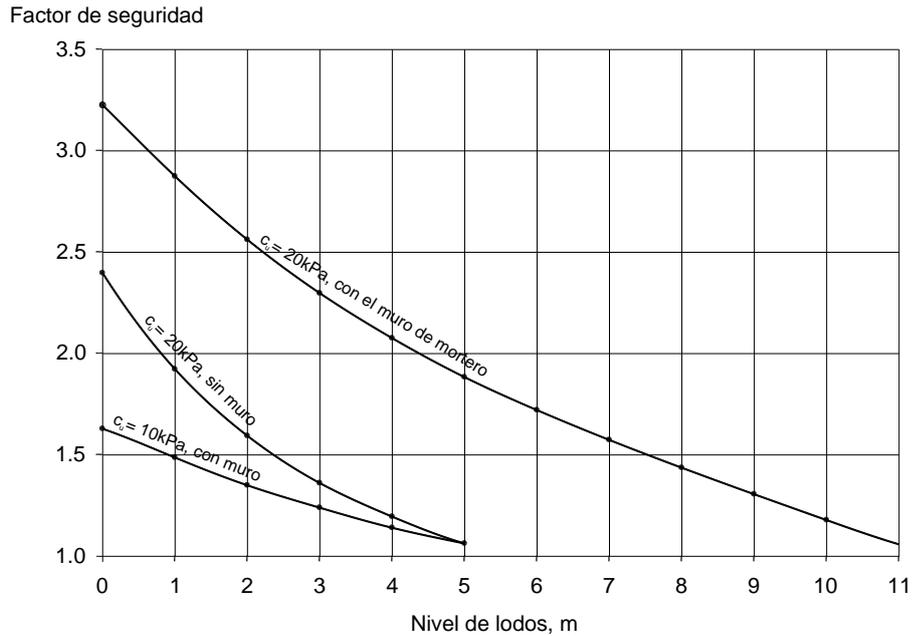


Ilustración 1. Influencia de la resistencia no drenada de la arcilla, del nivel del lodo y de la presencia de la pantalla perimetral sobre el factor de seguridad (FS) referente a la falla de fondo de la excavación

- El FS es directamente proporcional a c_u . Con mayor resistencia se obtiene mayores factores de seguridad.

También, (ilustración 2) es importante indicar que mientras se incrementa el descenso del nivel de lodos, así como con el incremento del diámetro de la excavación disminuye el FS por la pérdida de los efectos de problema axisimétrico en relación con el problema de deformaciones planas.

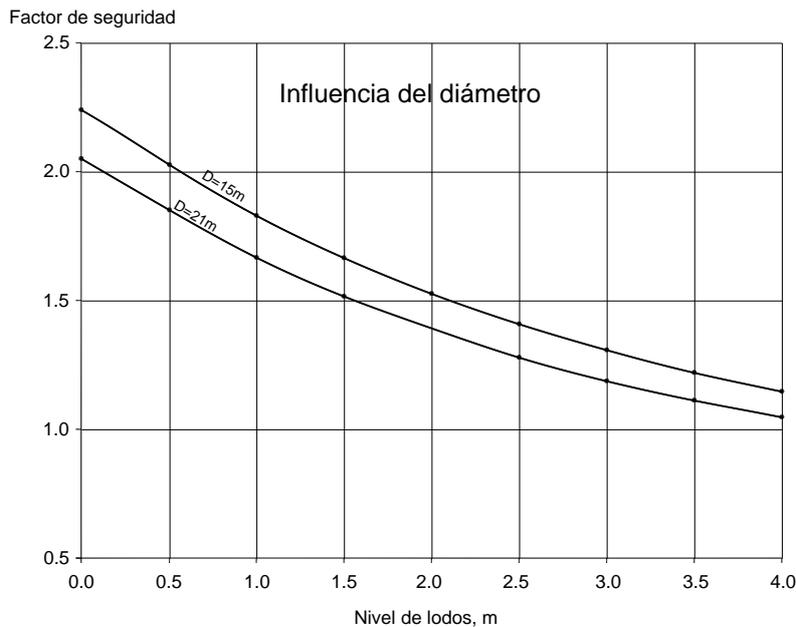


Ilustración 2. Influencia del diámetro de la lumbrera y del nivel de lodo sobre el factor de seguridad (FS)

δ) Estabilidad de la excavación por supresión hidráulica.

En la situación del fondo de excavación de lumbrera a cielo abierto, en la cercanía de la Primera Capa Dura, que se presenta como un acuífero confinado con presión de agua que en un piezómetro provoca ascensos que llegan cerca de superficie de suelo (piezómetro que toma lecturas en el punto 2, figura 65). La hipotética excavación se realiza en seco. En el fondo la altura de ascenso piezométrico es igual a cero (punto 1, ver figura 65). La diferencia ($\Delta\lambda$, figura 65) de niveles de agua en piezómetros en los dos puntos indica una presión hidráulica en la superficie de frontera entre la FAS y ED de:

$$u = \Delta\lambda \cdot \gamma_m \quad (17)$$

La fuerza hidráulica (U , figura 65) sobre toda la superficie circular del fondo con el radio R , en la interfase (5-6, figura 65) entre la FAS y ED es:

$$U = u \cdot R^2 \cdot \pi \quad (18)$$

La fuerza resistentes ($\sum FR$) consisten del peso (W) del tapón de forma de disco con espesor (D) y de la fuerza de cohesión (C) en la superficie cilíndrica 3-5-4-6-8 (figura 65).

El peso del tapón es:

$$W = \gamma_m \cdot R^2 \cdot \pi \cdot D \quad (19)$$

La fuerza de cohesión es:

$$C = 2 \cdot c \cdot R \cdot \pi \cdot D \quad (20)$$

La suma de fuerzas resistentes es:

$$\sum FR = \gamma_m \cdot R^2 \cdot \pi \cdot D + 2 \cdot c \cdot R \cdot \pi \cdot D \quad (21)$$

El factor de seguridad (FS) contra la falla por supresión es:

$$FS = \frac{\sum FR}{U} = \frac{\gamma_m \cdot R^2 \cdot \pi \cdot D + 2 \cdot c \cdot R \cdot \pi \cdot D}{u \cdot R^2 \cdot \pi} \quad (22)$$

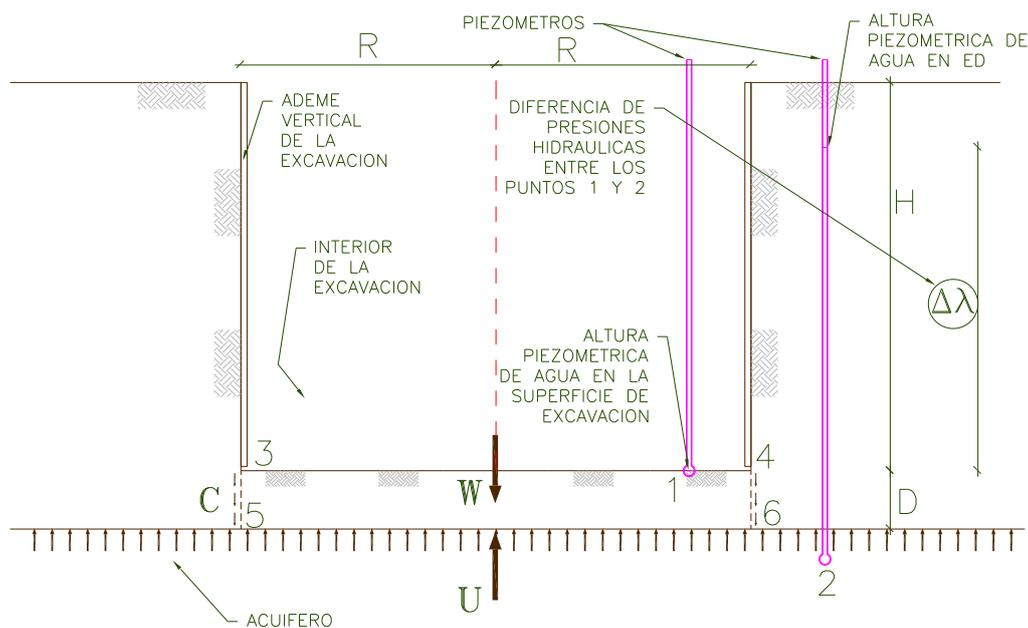
$$FS = \frac{\gamma_m \cdot R \cdot D + 2 \cdot c \cdot D}{u \cdot R} \quad (23)$$

Por ejemplo, en la lumbrera L-7 del Interceptor Oriente:

$$\gamma_m = 1.15 \frac{t}{m^3}$$

$$R = 7.2m$$

$$D = 0.7m$$



MECANISMO DE LA FALLA DE FONDO EN SUELOS ARCILLOSOS, CON $\phi=0$ Y $c, \gamma_m \approx \text{const.}$, POR SUPRESION HIDRAULICA

Figura 65. Falla del fondo de la excavación por exceso de presiones hidráulicas.

$$c = 2.0 \frac{t}{m^2}$$

$$u = 27.0 \frac{t}{m^2}$$

El factor de seguridad contra la falla de fondo pro supresión es:

$$FS = \frac{1.15 \cdot 7.2 \cdot 0.7 + 2 \cdot 2.0 \cdot 0.7}{27.0 \cdot 7.2} = \frac{8.60}{194.40} = 0.044$$

El factor de seguridad resulta muy pequeño. Puede notarse la falla del fondo de la excavación por la supresión hidráulica es inminente. Como conclusión puede decirse que es necesario disminuir las presiones hidráulicas en la ED por medio de bombeo o proporcionar una sobrecarga con lodos bentoníticos en el interior de la excavación.

3.2.3 Estabilidad de las zonas críticas como son los portales durante la construcción y durante las maniobras de escudo o tubo hincado

α) Estado de esfuerzos efectivos en arcilla en la región de la frontera sin confinamiento.

Durante la construcción de los túneles de drenaje profundo, durante la salida o entrada de escudo al interior de la lumbrera atravesando el prisma de suelo mejorado (el

“mejoramiento”), algunas veces han ocurrido las fallas por extrusión de arcillas (ver figura 66).

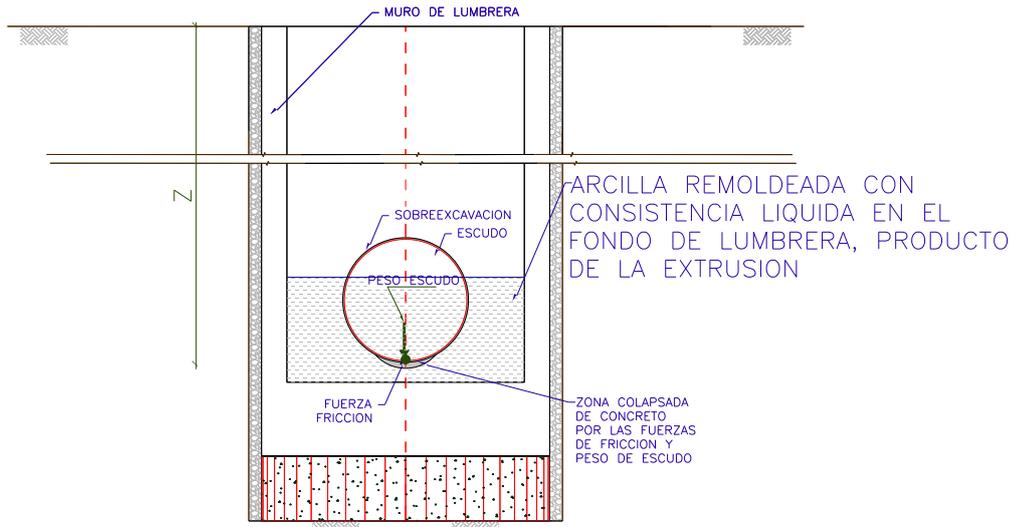
A través de algunas zonas del espacio anular entre el escudo y muro de lumbrera solían entrar grandes cantidades de arcilla (entre 250 a 350 m³) en muy corto tiempo en forma de chorros del fluido del suelo licuado, que llegaban a detenerse probablemente por el equilibrio de presiones/resistencias desde adentro y afuera de la lumbrera: en el exterior, las presiones se disipaban y en el interior se incrementaban hasta el punto de equilibrio cuando se producía el sello, deteniendo la extrusión.

En la parte inferior del escudo, en la superficie de contacto entre el muro de lumbrera por las fuerzas debidas al peso, fricción de escudo contra el concreto y por el momento de torsión necesario para romper zonas de mortero del “suelo mejorado”, una región de concreto sufría el colapso dando lugar a la perdida de confinamiento de arcillas en las zonas donde el “mejoramiento de suelo” no se había logrado de manera satisfactoria (figuras 66 y 67).

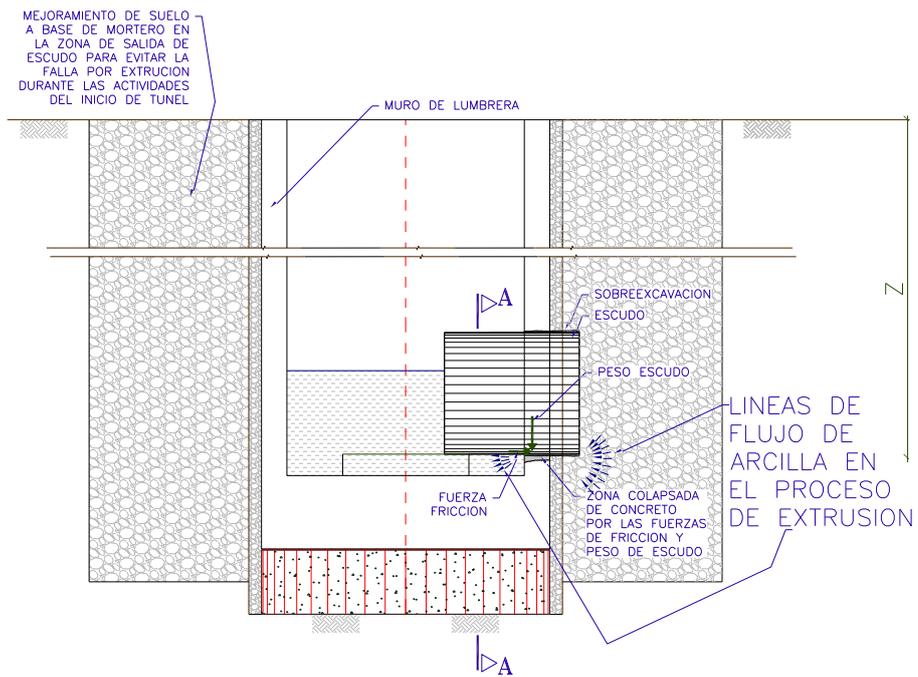
La extrusión de arcilla por debajo de escudo indica dos problemas:

- La insuficiencia de la resistencia estructural de concreto reforzado de la zona de apoyo de escudo sobre el muro de lumbrera en los instantes de inicio de excavación del túnel.
- La incompleta restitución de suelo natural (arcillas) por el mortero en las zonas de entrada y salida de escudo. Como el procedimiento de restitución es una obra oculta, no existe una metodología segura de verificación de su calidad. Tampoco, existe un método simple, seguro, de bajo costo y rápido, para la verificación y corrección de los errores como pueden ser bolsas o burbujas de suelo natural, contaminación del material de mortero, caídos de fragmentos de suelo natural, inadecuado colado con el tubo tremie, etc.

Puede decirse que el “mejoramiento de suelo” no es un método que garantiza la llegada y salida de escudo de la lumbrera sin riesgos. También, se ha observado que la actividad de llegada de escudo a la lumbrera es menos riesgosa que la salida. Durante la salida las cargas de reacción a la torsión y empuje que provoca el corte de suelo en el frente de escudo, pueden tener grandes concentraciones cuando se localizan en pequeñas regiones de apoyo en el muro de lumbrera, y así, la extrusión se puede generarse por cualquier imperfección de suelo mejorado en toda el área del frente de escudo que se comunica con la zona de sobre excavación y/o la zona inferior de escudo con las regiones de muro de lumbrera de concreto reforzado desmoronada o colapsada.

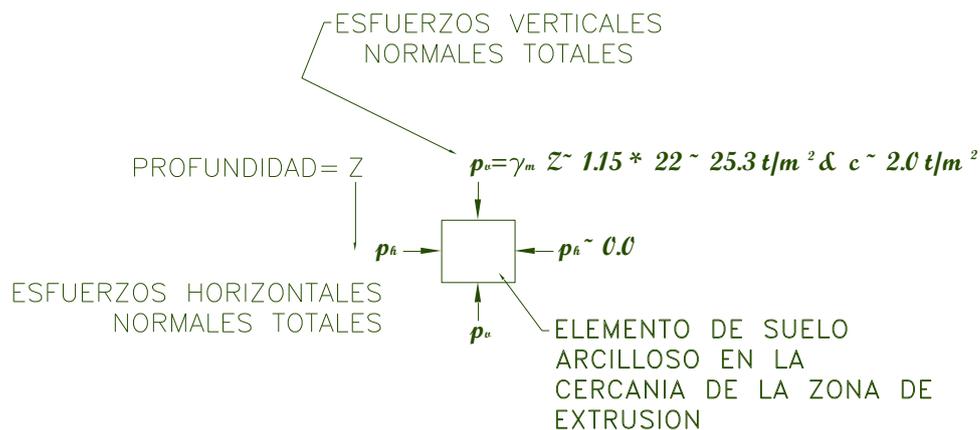


EXTRUSION DE ARCILLA EN EL INTERIOR DE LA LUMBRERA A TRAVES DE LA ZONA MEJORADA, SECCION A-A, ELEVACION



EXTRUSION DE ARCILLA EN EL INTERIOR DE LA LUMBRERA A TRAVES DE LA ZONA MEJORADA

Figura 66. Falla por extrusión de arcillas.



ESTADO DE ESFUERZOS EN UN ELEMENTO DE SUELO EN LA CERCANIA DE LA ZONA DE EXTRUSION DONDE SE PERDIO EL CONFINAMIENTO

Figura 67. Estado de esfuerzos totales en la cercanía de las aberturas en el muro de lumbrera donde se pierden los esfuerzos horizontales totales de confinamiento y se propician las condiciones para la extrusión de arcillas.

En un ejemplo de la falla por extrusión la zona inferior de escudo se situó en una profundidad de 22.0m (figura 67). En esta profundidad los esfuerzos verticales normales totales son del orden de 25 t/m² y los esfuerzos normales totales en el sentido horizontal llegan a valores cercanos a cero, lo que facilita la falla por extrusión, ya que el suelo natural tiene la resistencia al esfuerzo cortante alrededor de 2.0 t/m². Una importante característica de las arcillas lacustres del Valle de México es que en la mayoría de los casos el límite líquido es inferior al contenido natural de agua. Este hecho facilita la transformación rápida de material de arcilla desde la consistencia firme a la líquida después del colapso de la estructura interior del suelo (remoldéo).

β) Implementación del anillo cilíndrico y el sello perimetral para evitar la pérdida de confinamiento de suelo natural (arcillas) en las regiones perimetrales alrededor del escudo atravesando el portal de entrada y salida.

Para evitar los problemas de mejoramiento de suelo que tienen implícito un alto costo, un largo tiempo de construcción y otras desventajas de las obras ocultas (difícil detección y corrección de los errores), se diseñó un portal de salida y entrada del escudo a la lumbrera con las siguientes características:

- Se eliminan las zonas de mejoramiento de suelo natural para el paso de escudo (figura 68).

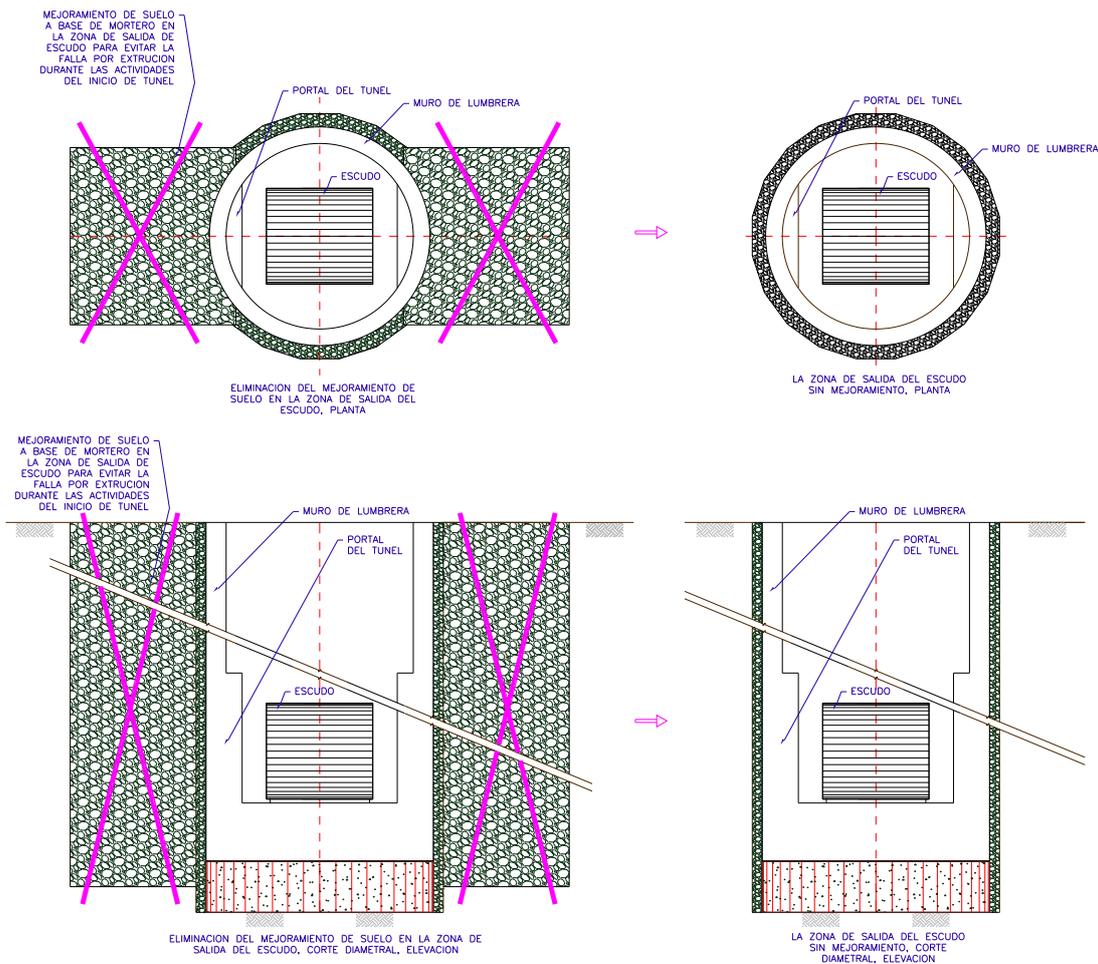


Figura 68. Eliminación del mejoramiento de suelo en las zonas de entrada y salida de escudo.

En la zona perimetral de la intersección del fuste de escudo y el muro de lumbreira se implementa una estructura de acero para absorber las fuerzas de escudo como son el peso, fricción por el movimiento a lo largo del eje de túnel y el momento de torsión durante el giro para el corte con los dientes o cuchillos del material de suelo o mortero que se presenta en la frente (figura 69).

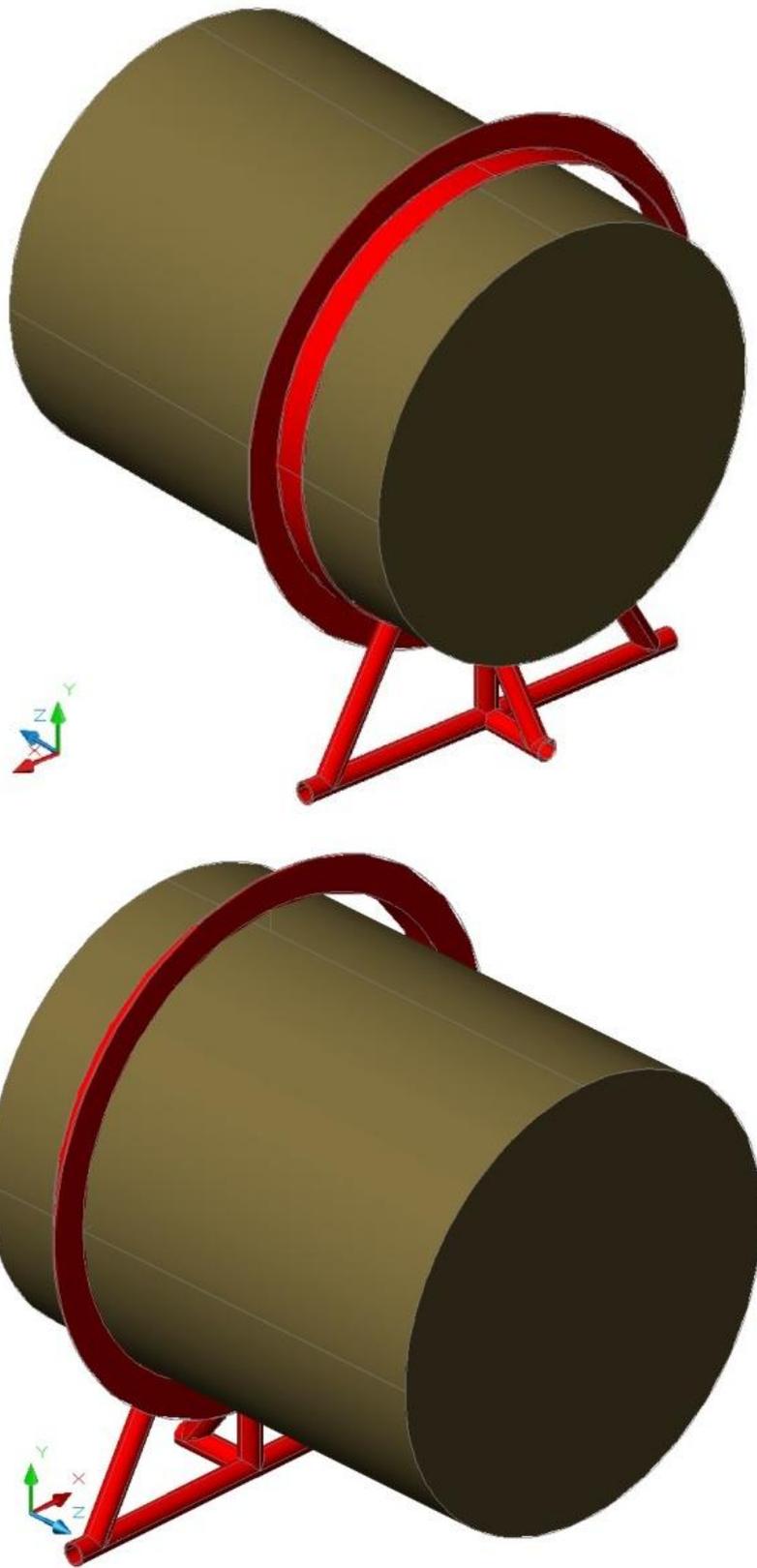


Figura 69. Escudo apoyado en el anillo metálico del portal.

Estas fuerzas, luego se transmiten, por medio de una silleta de acero estructural (figuras 54, 55 y 69), al portal de concreto reforzado y a las zonas de la losa de fondo de concreto reforzado que disponen de una resistencia suficientemente alta para absorber las fuerzas de escudo en movimiento (figura 70).

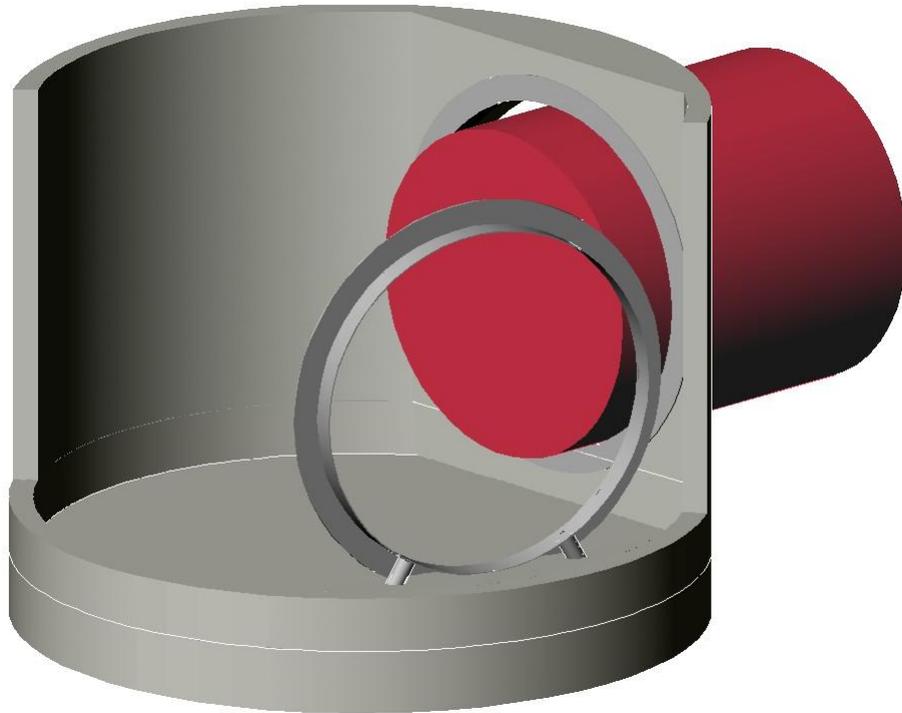


Figura 70. Escudo apoyándose en el anillo metálico, transmitiendo las fuerzas al portal y la losa de fondo por medio de la estructura del tipo silleta de tubería de acero.

La zona perimetral del muro de la lumbrera en la intersección con el escudo se refuerza con un **portal de salida o entrada de escudo (figura 71)**.

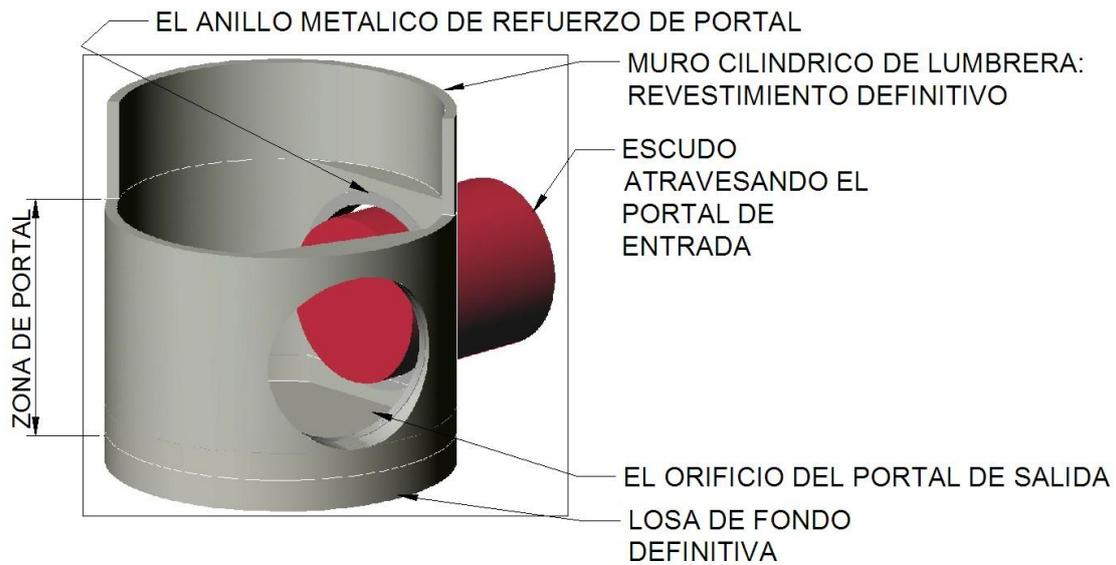


Figura 71. Portal de entrada y salida de escudo.

En la zona de paso de escudo por el portal de concreto reforzado se implementa un tapón de mortero.



Figura 72. Zonas de mortero en los portales de lumbreira.

En los instantes de paso de escudo a través del anillo metálico se cierra un sello tipo diafragma, para evitar la entrada de agua y de suelo en suspensión al interior de la lumbreira por el espacio anular entre el escudo y anillo metálico. Este sello consiste de tres partes:

Un anillo flexible del polímero termoplástico o termofijo con propiedades de elastómero de forma anular que se fija por medio de los tornillos al anillo metálico del portal (figura 73 y 74).



Figura 73. Sello flexible en el portal.

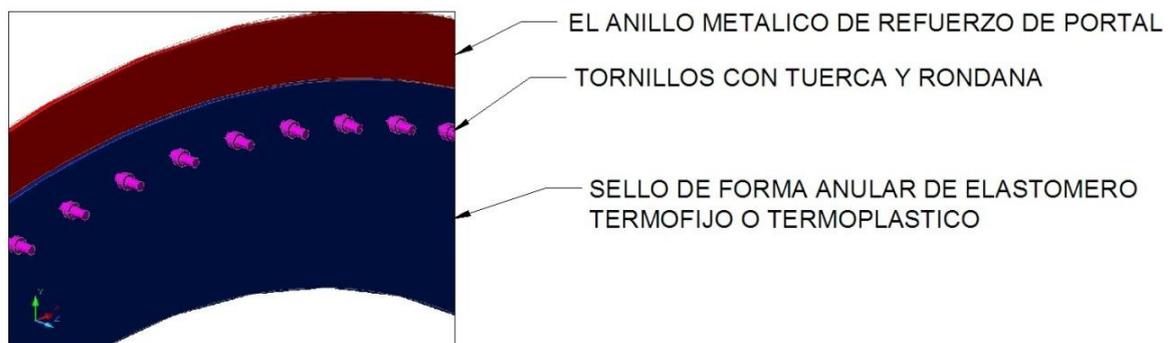


Figura 74. Detalle de fijación del sello flexible de elastómero al anillo metálico por medio de los tornillos.

Una serie de placas que pueden moverse en el sentido radial respecto al eje de túnel, que perimetralmente forman un diafragma que puede cambiar el diámetro y de tal forma fijar el sello de polímeros a la camisa cilíndrica de escudo. En la figura 75 se muestra la posición abierta de las placas del diafragma.

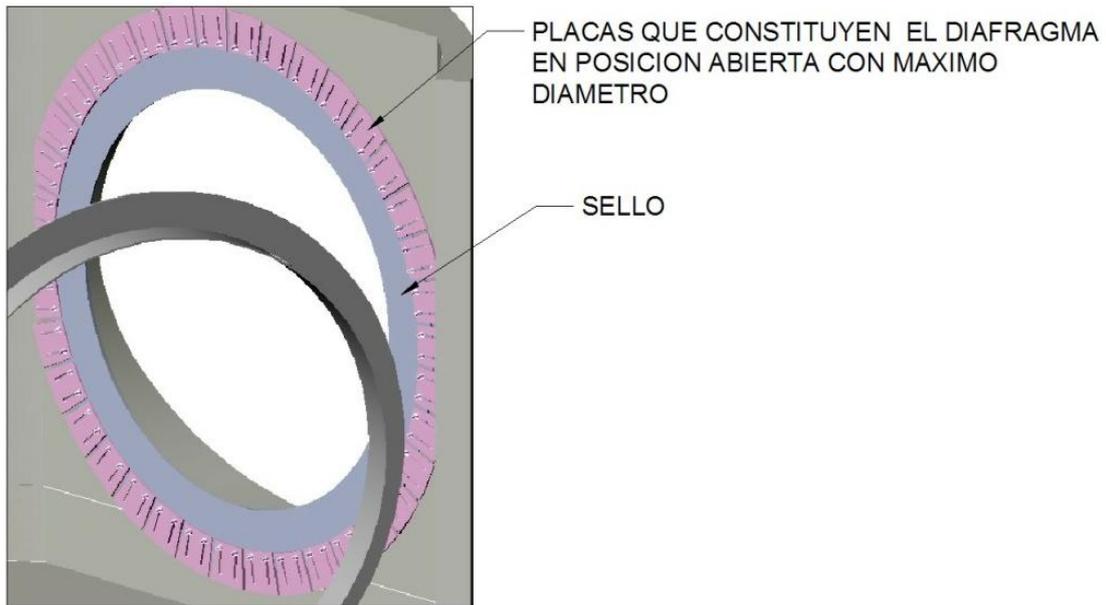


Figura 75. Diafragma abierto.

El detalle de fijación de las placas del diafragma se indica en la figura 76. Puede notarse que las placas disponen de orificios ovalados que las permite el movimiento radial. Las placas se conectan con el anillo metálico por medio de los tornillos con tuerca y rondana.

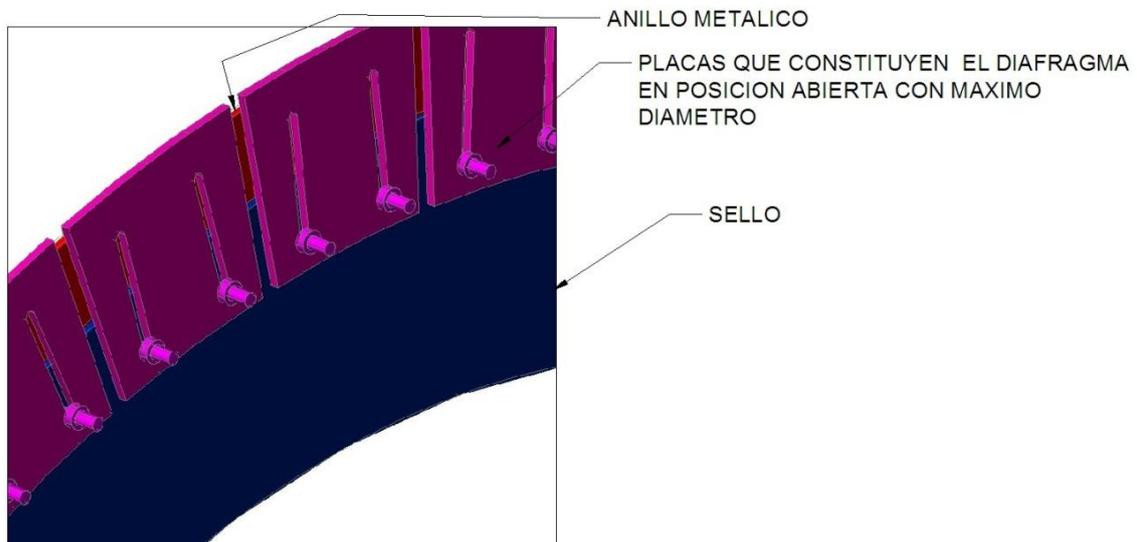


Figura 76. El detalle del diafragma abierto.

En la figura 77 se indica el diafragma en su posición cerrado con el diámetro de escudo, teniendo reservas para la posibilidad de abrazar el escudo en cualquier posición dentro del anillo de acero que define al portal.

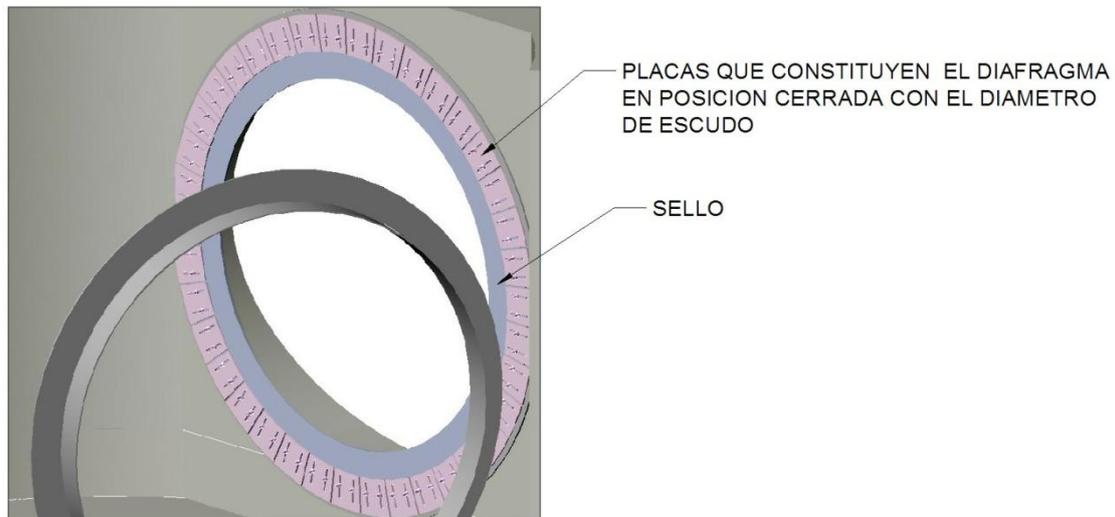


Figura 77. El diafragma con el diámetro de escudo.

El detalle de la posición de las placas que constituyen el diafragma con el diámetro de escudo se indica en la figura 78. Puede notarse que los tornillos se encuentran en la región media de los orificios ovalados.

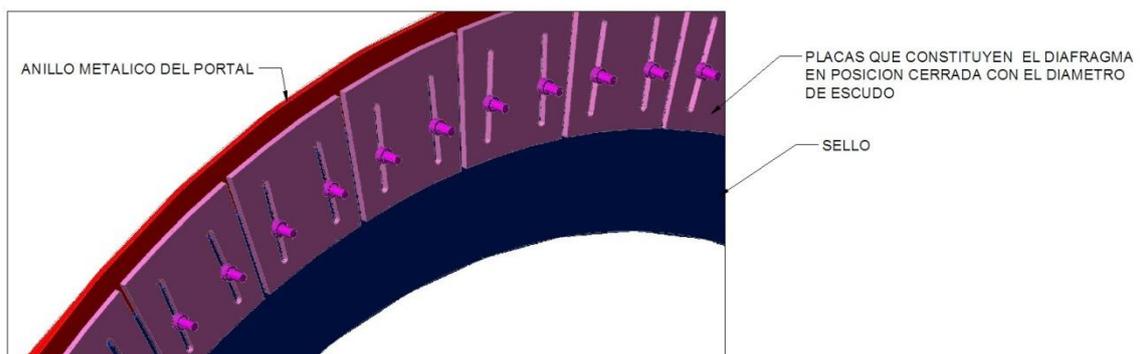


Figura 78. El detalle del diafragma con el diámetro de escudo.

Cuando el frente de escudo atraviesa el plano vertical del portal el sello empieza a deformarse y tomar la forma de la camisa de escudo. El incremento de diámetro del sello que queda en contacto con la camisa de escudo provoca altos esfuerzos radiales que contribuye a un buen sellado y no permiten el paso de agua subterránea y de suelo en suspensión al interior de la lumbrera. La figura 79 ilustra la configuración del sello alrededor de la camisa de escudo.

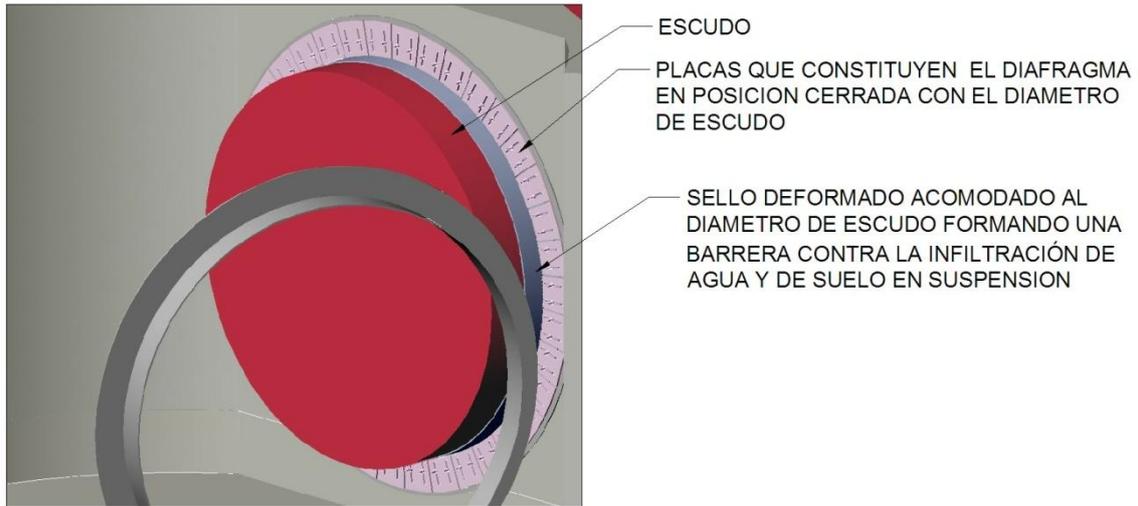


Figura 79. La configuración del sello alrededor de la camisa de escudo.

También, en la figura 80 se indica el detalle del sello alrededor del escudo en los instantes de las actividades de la entrada de escudo al interior de la lumbrera. Durante la fase de salida de escudo de la lumbrera el sello se voltea hacía el exterior de la lumbrera.

Con el portal de entrada y salida de escudo equipado con el sello, se han realizado decenas de lumbreras sin problemas de falla de frente, de infiltración de agua y suelo al interior de la lumbrera. El ambiente geotécnico de estas lumbreras es la Zona de Lago del Valle de México.

Los ahorros, aumento de la rapidez de las obras e incremento de seguridad son significantes comparándolo con el sistema de “mejoramiento” de suelo.

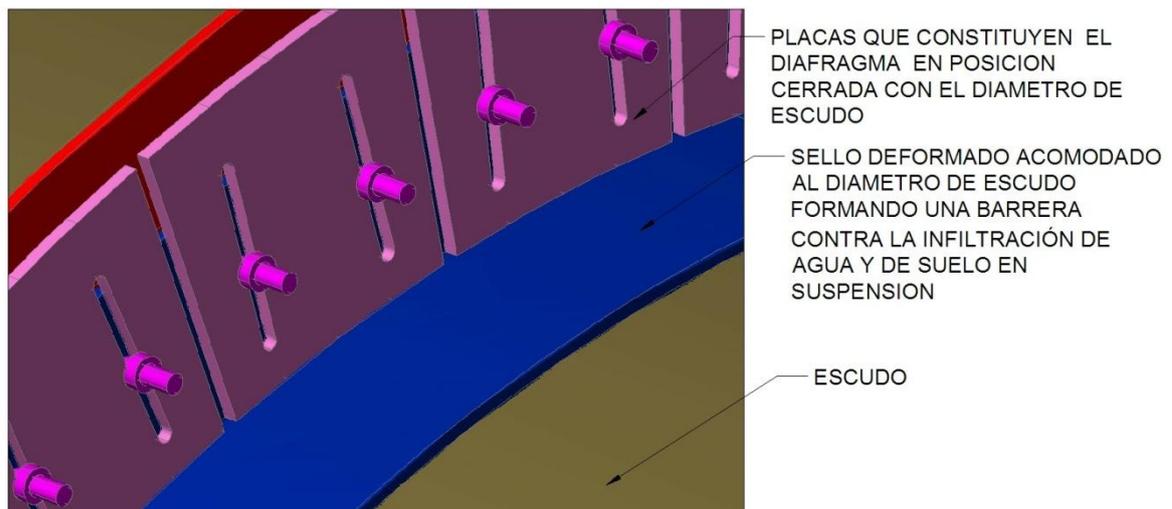


Figura 80. Detalle del sello alrededor del escudo.

3.2.4 Análisis de los desplazamientos de suelo en el sitio de construcción durante la obra

El planteamiento del problema:

Las lumbreras de Drenaje Profundo, en la Zona de Lago del Valle de México, en la gran mayoría de los casos se construyen en las áreas con densa infraestructura como son edificios bajos y altos con cimentaciones profundas, edificios clasificados como monumentos históricos, vialidades, puentes, trenes urbanos con sus estaciones en posiciones elevadas, superficiales y profundas, conductos de servicios de teléfonos, luz de alta y baja tensión, líneas de agua potable y drenaje, túneles de varios tipos de transporte, etc. En este ambiente geotécnico y de alta densidad de infraestructura es de interés primordial evitar o minimizar los desplazamientos de suelo provocados por la construcción de las lumbreras y túneles, tanto en el sitio de la obra en la superficie, como en las zonas profundas, colindantes, por lo menos hasta donde se extiende la influencia por la construcción de lumbreras.

Por otro lado, la mayoría de las estructuras e instalaciones vecinas sufren de problemas de desplazamientos preexistentes, como son por ejemplo:

El hundimiento regional causado por la sobre explotación de agua en el Valle de México que induce las condiciones hidrodinámicas del agua subterránea, prácticamente desde la superficie de suelo hasta las profundidades mayores de 200m, en donde se encuentran las puntas de los pozos de bombeo.

Las características principales del hundimiento regional son las siguientes: la máxima velocidad de hundimiento es en la superficie de suelo; las magnitudes de las velocidades de hundimiento regional tienden disminuir con la profundidad. Las magnitudes de las velocidades de hundimiento regional varían entre las muy pequeñas hasta las máximas del orden de 40cm/año. Estas discrepancias de hundimientos causan perjudiciales hundimientos diferenciales tanto en el nivel de la superficie como en los niveles profundos del subsuelo. Es muy difícil predecir el desarrollo futuro de los hundimientos ya que dependen de la demanda de agua potable que es ligada a la expansión demográfica, de las acciones de la reducción de las fugas de agua potable (~60% a 70%) de tendencias de abastecimiento de agua de las fuentes alternas afuera del Valle de México y del sellado de los pozos de agua potable a lo largo de su ademe. Para llevar los registros del hundimiento regional es necesario llevar mediciones de hundimientos tanto en la superficie como en las profundidades donde se pueden detectar. También, es necesario llevar los registros de las mediciones de las presiones de agua subterránea desde la superficie (superficie con la presión igual a cero) hasta las profundidades donde no existen alteraciones de las presiones hidrostáticas.

El hundimiento regional provoca innumerables problemas en todas las estructuras e instalaciones que tienen alguna relación física con el subsuelo: emersión de las estructuras apoyadas en las profundidades con los hundimientos menores que la

superficie, inversión de dirección de líneas de conducción de agua a base de gravedad como son las líneas de drenaje, canales, daños en las cimentaciones y roturas de instalaciones subterráneas entre muchas otras.

Las obras en el proceso o terminadas que provocaron asentamientos que todavía están en el proceso y que están influyendo el subsuelo en sus alrededores. La detección de estos problemas consiste en la revisión de los proyectos y de la instrumentación y mediciones existentes. En donde no existe esta información, es necesario proceder con los estudios, levantamientos, instrumentación y mediciones para evaluar la importancia de los fenómenos de los desplazamientos de suelo existentes en el proceso de desarrollo.

La determinación de los esfuerzos totales, efectivos y de las presiones hidráulicas en el subsuelo antes del inicio de la obra es importante obtener como el punto de partida de cálculo de desplazamientos durante la construcción y durante la vida útil.

Durante la excavación y restitución del suelo natural con los lodos bentoníticos ocurren los cambios de esfuerzos horizontales en las paredes verticales de la excavación de forma cilíndrica y en el plano aproximadamente horizontal del fondo de la excavación. En la mayoría de los casos, los esfuerzos totales horizontales debidos a la presión de los lodos son superiores a los esfuerzos normales totales horizontales en la masa de suelo antes del inicio de la obra. Las presiones verticales de los lodos en el fondo de la excavación son menores que los esfuerzos totales verticales en el nivel de fondo de la excavación (ver figuras 60 Y 61). Este proceso de incremento de esfuerzos horizontales y disminución de esfuerzos totales verticales culmina en el nivel de fondo de la lumbrera.

Por ejemplo los esfuerzos verticales totales en el subsuelo son aproximadamente iguales a:

$$\gamma_m \approx 1.10 \frac{t}{m^3} = \text{el peso volumétrico promedio de suelo saturado de la FAI,}$$

$$z = \text{la profundidad del punto considerado (m),}$$

$$p_v = \gamma_m \cdot z = 1.10 \cdot z = \text{la presión vertical normal total en la profundidad } z, \text{ (t/m}^2\text{).}$$

La presión hidrostática de los lodos en la profundidad considerada es:

$$\gamma_l \approx 1.05 \frac{t}{m^3} = \text{el peso volumétrico de lodo bentonítico,}$$

$$p_l = \gamma_l \cdot z = 1.05 \cdot z = \text{la presión hidrostática de los lodos en función de la profundidad (z) del punto considerado, (t/m}^2\text{).}$$

La diferencia (Δp_v) entre los p_v y p_l indica el alivio de presiones totales en el nivel de fondo de la excavación lo que provoca una pequeña expansión de suelo o desplazamientos hacía arriba con el máximo en el centro de lumbrera, atenuándose con

el incremento de la distancia del centro. Por ejemplo, en el nivel de fondo de la lumbrera a 32m (L-7, del Interceptor Oriente), el alivio de presiones totales es:

$$\Delta p_v = p_v - p_l = 1.10 \cdot z - 1.05 \cdot z = 0.05 \cdot z = 0.05 \cdot 32 = 1.6 \text{ t/m}^2$$

Puede notarse que existe una relación aproximadamente lineal entre la profundidad (z) de la excavación y el alivio de las presiones (Δp_v).

Las presiones horizontales totales normales en la masa de suelo (p_h) se obtienen de la siguiente manera:

σ_v = esfuerzos normales verticales efectivos en la profundidad considerada,

σ_h = esfuerzos normales horizontales efectivos en la profundidad considerada,

$K_o \approx 0.5$ = relación de esfuerzos horizontal y vertical efectivo de reposo en el punto considerado,

u_{din} = la presión de poro dinámica en el punto de subsuelo considerado, t/m^2 ,

u_{st} = presión de poro hidrostática en el punto considerado, t/m^2 ,

Δu = abatimiento de presión de poro respecto a la distribución de presiones hidrostáticas,

La presión hidrodinámica se obtiene restando el decremento de las presiones hidráulicas de la presión hidrostática.

$$u_{din} = u_{st} - \Delta u \quad (24)$$

Restando la presión hidrodinámica de las presiones totales verticales se obtiene el esfuerzo vertical efectivo.

$$\sigma_v = p_v - u_{din} = \gamma_m \cdot z - u_{din} \quad (25)$$

El esfuerzo horizontal efectivo se obtiene multiplicando el esfuerzo vertical efectivo con la relación de esfuerzos de reposo (K_o).

$$\sigma_h = K_o \cdot \sigma_v = K_o \cdot (p_v - u_{din}) = K_o (\gamma_m \cdot z - u_{din}) \quad (26)$$

El esfuerzo total en el sentido horizontal es igual a la suma de esfuerzo efectivo horizontal y presiones hidráulicas o hidrodinámicas.

$$p_h = \sigma_h + u_{din} = K_o (\gamma_m \cdot z - u_{din}) + u_{din} = K_o \gamma_m z + u_{din} (1 - K_o) \quad (27)$$

Substituyendo la ecuación (24) en la (27) se obtiene el valor de las presiones totales de suelo en el sentido horizontal en función de esfuerzos totales verticales, de la presión hidrostática y del valor de abatimiento de presiones de agua a partir del nivel hidrostático.

$$p_h = K_o \gamma_m z + (u_{st} - \Delta u)(1 - K_o) \quad (28)$$

En la ecuación (28) puede notarse, una relación muy importante: los esfuerzos totales horizontales disminuyen mientras se incrementa el abatimiento de las presiones hidráulicas. Esta relación es sumamente importante en la construcción túneles en suelos blandos: las filtraciones de agua al interior del túnel causan el abatimiento de las presiones hidráulicas en la región de suelo cercana al revestimiento y de esta manera se disminuyen las presiones totales de suelo en el sentido horizontal quedando las presiones totales verticales sin cambio. Este fenómeno frecuentemente provoca fuertes desplazamientos del revestimiento: en el sentido horizontal aumenta el diámetro y en el sentido vertical el diámetro se disminuye.

Si los abatimientos de presiones hidráulicas en el subsuelo son suficientemente altos, los esfuerzos totales horizontales en la masa de suelo pueden ser muy por debajo de las presiones hidrostáticas de lodos en la misma profundidad. Así se llega a la ecuación (29) que representa el incremento de las presiones (Δp_h) totales horizontales en la superficie cilíndrica de la pared de la excavación de lumbrera:

$$\Delta p_h = p_l - p_h = \gamma_l \cdot z - [K_o \gamma_m z + (u_{st} - \Delta u)(1 - K_o)] \quad (29)$$

$$\Delta p_h = (\gamma_l - K_o \gamma_m)z - (u_{st} - \Delta u)(1 - K_o) \quad (30)$$

En la ecuación (30) puede notarse que el incremento de presiones totales en el sentido horizontal en la pared de la excavación de la lumbrera consiste de dos componentes: primera componente está afectada por el (K_o) y la segunda por el (Δu).

Como ejemplo, el incremento de las presiones (Δp_h) totales horizontales normales en la superficie cilíndrica de la pared de la excavación, donde $z=15.0m$, $u_{st}=12.5t/m^2$, $\Delta u = 4.0 t/m^2$, es:

$$\Delta p_h = (1.05 - 0.5 \cdot 1.10) \cdot 15 - (12.5 - 4.0) \cdot (1 - 0.5) = 7.5 - 4.25 = 3.25 \frac{t}{m^2}$$

Puede concluirse que en el sentido horizontal, la presión (Δp_h), tiende a incrementar el diámetro de la excavación. En los casos extremos, los fuertes abatimientos de presiones de agua subterránea, pueden ocasionar la formación de las grietas radiales en el subsuelo, provocando una repentina e imprevista pérdida de lodos.

En el caso de la lumbrera L-7 del Interceptor Oriente, la excavación terminada tenía la siguiente distribución aproximada de las presiones Δp_v y Δp_h , y de los cambios de esfuerzos y desplazamientos en la masa de suelo:

Distribución de las presiones Δp_v y Δp_h (ver la figura 81):

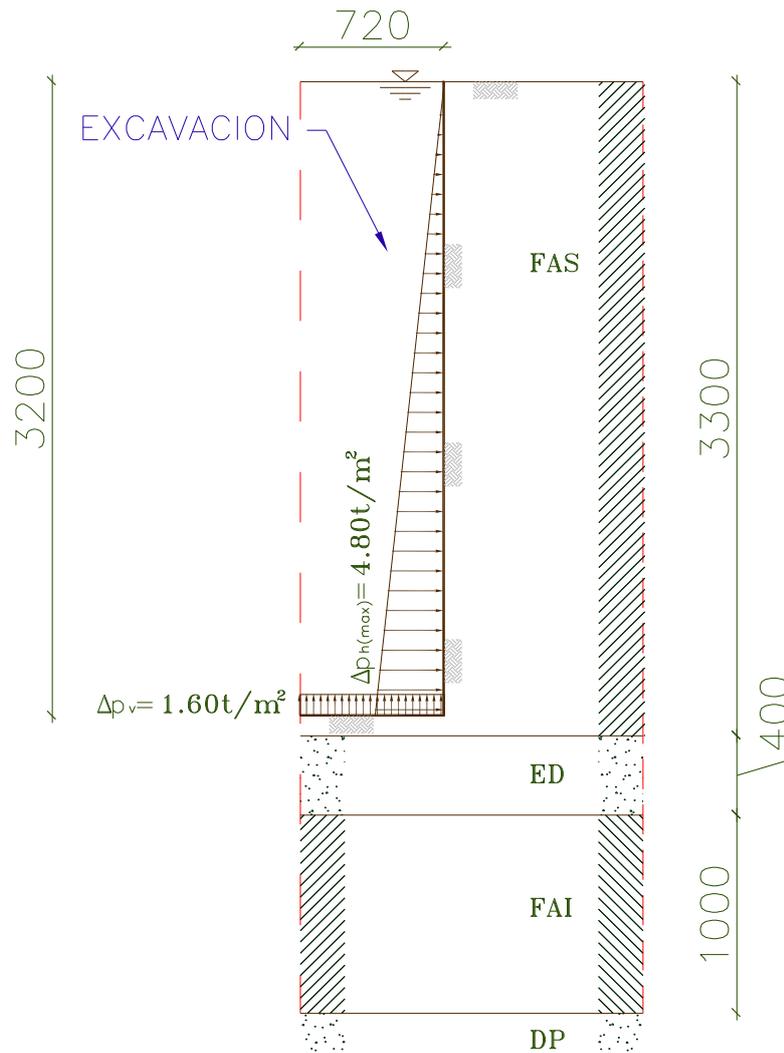


Figura 81. Distribución de las presiones totales verticales y horizontales en el fondo y las paredes de la excavación, unidades en cm, elevación, corte diametral.

Distribución de los esfuerzos horizontales y verticales en la masa de suelo producida por los Δp_v y Δp_h :

Si se realiza un análisis de desplazamientos a corto plazo, tomando en cuenta que las deformaciones volumétricas en arcillas saturadas son iguales a cero y que los esfuerzos y desplazamientos ocurren por las cargas desequilibradas en el fondo y las paredes de la excavación, se obtienen los siguientes resultados aproximados de desplazamientos y esfuerzos, tomando en cuenta el modelo axisimétrico.

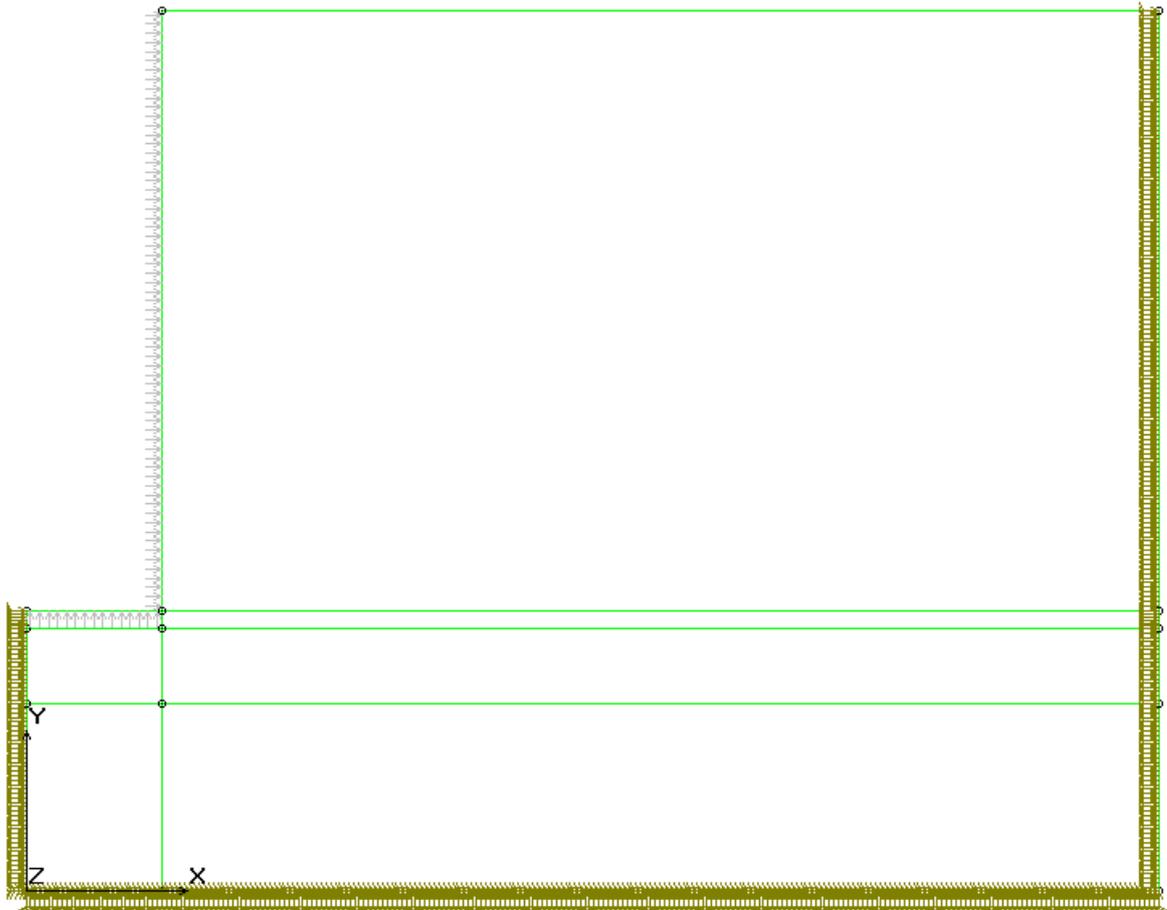


Figura 82. La configuración del modelo estructural.

En el modelo estructural (figura 82) puede notarse la geometría, las unidades FAS, CD y FAI, las condiciones de contorno de los cambios de presiones en el sentido horizontal y vertical en la pared y fondo respectivamente, y las condiciones de contorno de desplazamiento. En las fronteras verticales se restringen desplazamientos horizontales y en la frontera inferior (superficie de depósitos profundos) se restringen todos los desplazamientos.

En la figura 83 se presenta la distribución de los elementos SOLID bidimensionales utilizados en el problema axialmente simétrico.

Los máximos desplazamiento horizontales pueden esperarse en la zona inferior de la excavación (figura 84). Pude notarse que los desplazamientos verticales disminuyen con la distancia al eje de la lumbrera.

En la figura 85 se nota la distribución de los esfuerzos horizontales en la masa de suelo. En la cercanía y en la misma CD existen perturbaciones de esfuerzos por el contraste de las rigideces de los materiales de la FAS y FAI en relación con la CD.

En la figura 86 se nota la distribución de los esfuerzos verticales en la masa de suelo. En la mayoría de las regiones los esfuerzos son a tensión.

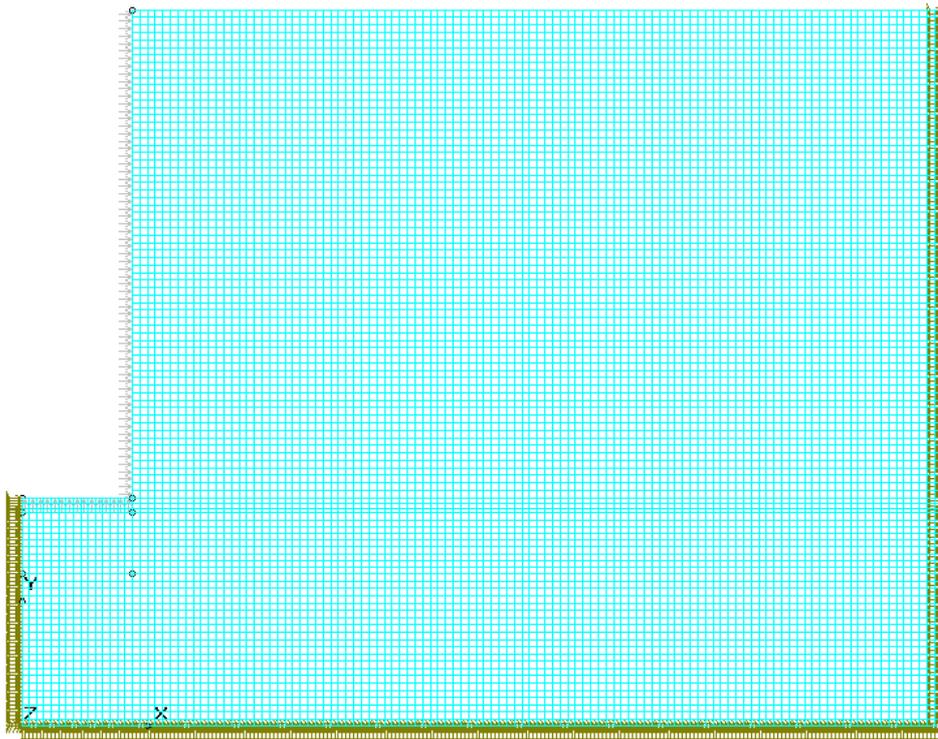


Figura 83. Modelo con elementos SOLID 2D, axisimétricos.

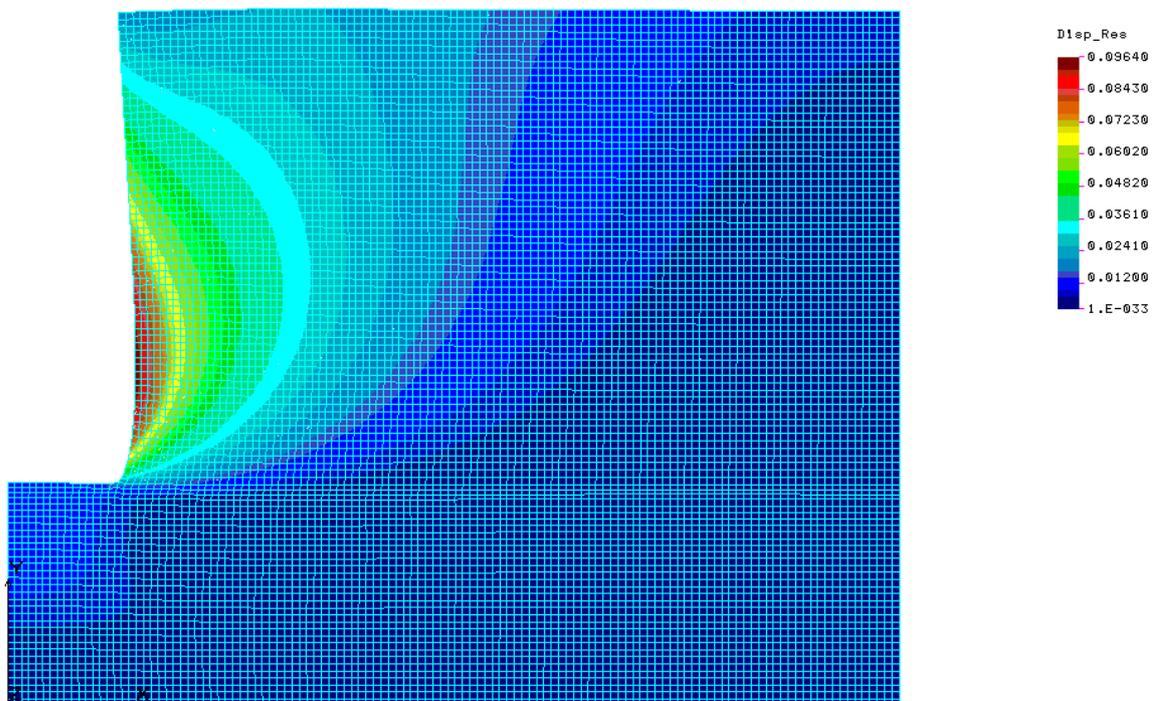


Figura 84. Desplazamientos. Unidades en ton y m. Los valores negativos representan la compresión y positivos la tensión.



Figura 85. Esfuerzos horizontales. Se marca la influencia de la CD. Unidades en ton y m. Los valores negativos representan la compresión y positivos la tensión.



Figura 86. Esfuerzos verticales normales. Unidades en ton y m. Los valores negativos representan la compresión y positivos la tensión.



Figura 87. Esfuerzos horizontales perpendiculares al plano de dibujo. Unidades en ton y m. Los valores negativos representan la compresión y positivos la tensión.

La distribución de los esfuerzos horizontales en el sentido perpendicular al plano de dibujo se muestra en la figura 87. Se nota la tensión máxima en la cercanía de la lumbrera que paulatinamente disminuye con la distancia respecto al eje vertical de la lumbrera.

De los resultados de análisis podemos deducir el concepto del desarrollo de desplazamientos en la masa de suelos durante la excavación con restitución del suelo natural con los lodos bentoníticos (figuras 82 a 87).

Puede notarse que la Capa Dura (CD) actúa como un freno que absorbe significantes esfuerzos por tensión. En la Formación Arcillosa Superior (FAS) la región crítica donde actúan los máximos esfuerzos por tensión horizontales (figura 87) perpendiculares al plano de dibujo, se encuentra en la zona del tercio medio de la profundidad de excavación, cerca de la pared. Puede notarse que en esta zona pueden iniciarse las grietas radiales, en casos extremos. También, la región con los desplazamientos máximos se encuentra en la misma zona.

3.3 Análisis a largo plazo

En las consideraciones geotécnicas de lumbreras a largo plazo siempre se toma en cuenta la presencia de túneles y conductos superficiales unidas a ellas. Los fenómenos que más influyen al comportamiento de las lumbreras y las estructuras e instalaciones convergentes son: el hundimiento regional (HR) y los sismos (S).

El hundimiento regional siempre implica el máximo desplazamiento vertical en la superficie de suelo y su paulatina disminución con la profundidad: en mayor profundidad menor hundimiento. Es decir, donde el hundimiento de superficie es de 20cm por año, el hundimiento en la profundidad de 15m no puede ser mayor de 20cm por año (figura 89). También, en la superficie de suelo el valor del HR cambia de punto a punto (figura 88). La grave consecuencia del HR son los hundimientos diferenciales en el sentido vertical y horizontal referido a algún punto en la superficie de suelo.

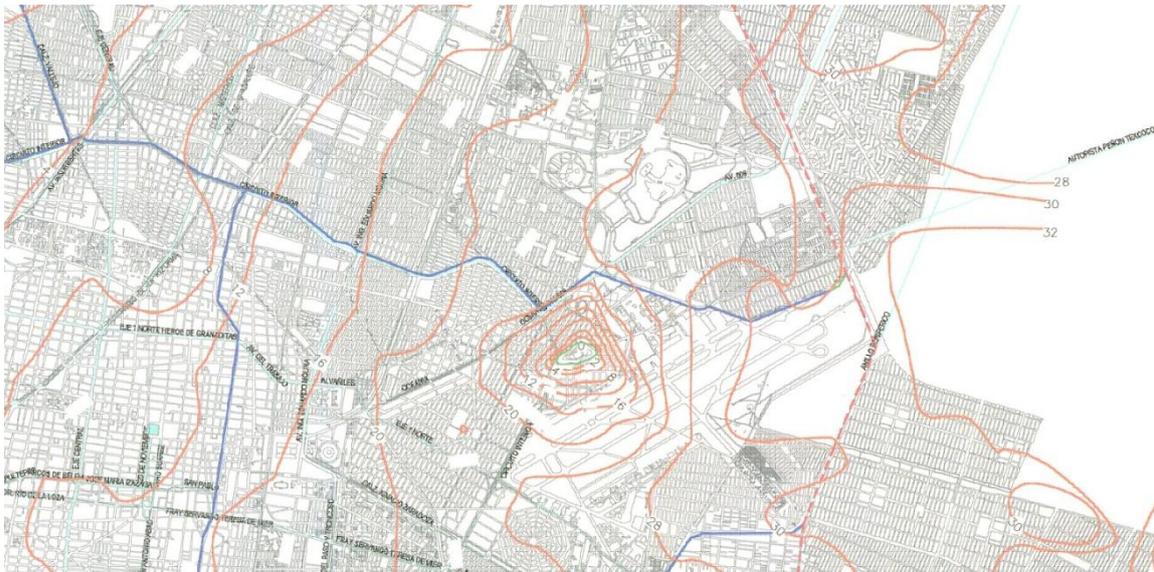
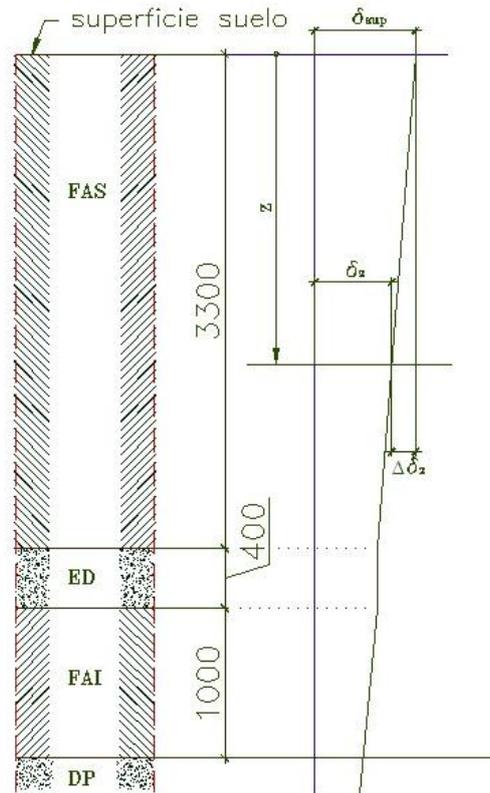


Figura 88. Un ejemplo del hundimiento regional en la Ciudad de México. En las curvas de igual hundimiento de color rojo indican hundimientos de la superficie por año en centímetros.

En la figura 89 (referencia xvi) puede verse que con la mayor profundidad (z) puede esperarse el mayor hundimiento diferencial $\Delta\delta_z$. En el caso de estructuras subterráneas rígidas verticales como son los pilotes, pilas (referencia viii) y lumbreras, unas partes se hunden más despacio que el suelo, otra se mueve igual que el suelo y a veces se presentan partes que se mueven con más rapidez que el suelo (figura 92).



δ_{sup} = HR anual de la superficie de suelo.
 δ_z = HR anual en la profundidad z.
 $\Delta\delta_z$ = desplazamiento diferencial anual por el HR entre la superficie y un punto en la profundidad z.

Figura 89. Diagrama de las velocidades del HR en función de la profundidad.

Los fuertes sismos sacuden el Valle de México periódicamente a cada 30 a 50 años aproximadamente. Desafortunadamente, no existen suficientes registros para realizar un análisis estadístico con el fin de llegar a los valores confiables de la relación (*intensidad del sismo*)/(*años de recurrencia del sismo*) para cada sitio del actual o futuro proyecto. En el transcurso de la historia reciente se había notado que los daños sísmicos abarcan el problema de la rotura de los conductos subterráneos cuando existen bruscos cambios de rigidez o dirección. También, con la profundidad los daños sísmicos disminuyen, resultando los túneles con muy pocos daños.

3.3.1 Análisis de los desplazamientos de lumbrera-túnel a largo plazo tomando en cuenta el hundimiento regional

Para un análisis detallado del comportamiento de la lumbrera en conjunto con las estructuras convergentes como son túneles y varios tubos de descarga en la cercanía de la superficie de suelo, se requieren datos precisos referentes al perfil estratigráfico, físico, hidráulico del subsuelo agregando las nivelaciones de la superficie y en los bancos profundos (figura 90). Estos datos en la mayoría de los casos son inexistentes o

incompletos de tal manera que simplemente no se toman en cuenta durante la elaboración del proyecto, construcción y operación del Drenaje Profundo.

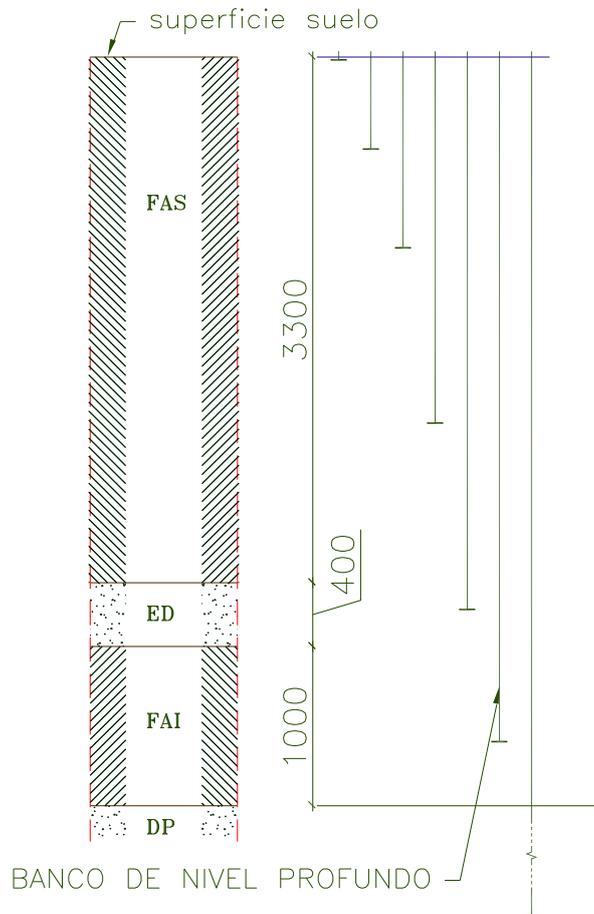


Figura 90. Distribución de los bancos profundos para las mediciones del HR.

Después de varios años de servicio cuando los daños por el HR llegaron a interferir con el servicio de drenaje satisfactorio, empiezan a resolverse los problemas de manera aislada y fragmentada. Las dificultades que resultan del HR pueden ser: el rompimiento de las conexiones entre la tubería y las lumbreras provocando las fugas de agua y consecuente socavación de dimensiones pequeñas a grandes (figura 91) e inversión de las pendientes de las tuberías donde se pierde una parte o el total de eficiencia hidráulica.

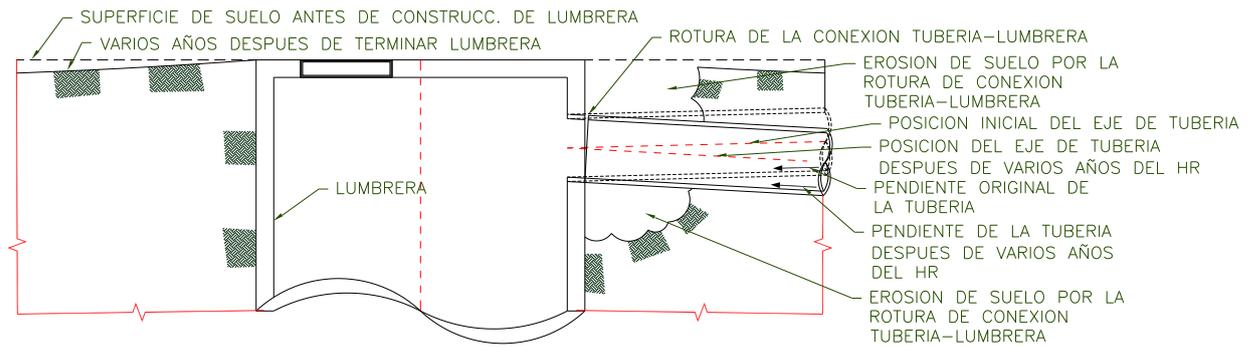


Figura 91. Daños en la conexión lumbrera-tubería por el HR cerca de la superficie de suelo.

La zona de conexión entre el túnel y lumbrera es otra región crítica, donde los desplazamientos diferenciales generados por el HR no son tan pronunciados como en la superficie de suelo, pero todavía pueden provocar daños tanto en revestimiento de túnel como en la estructura de la lumbrera.

Las soluciones a largo plazo consisten en la implementación de conexiones flexibles y de expansión que pueden absorber estos desplazamientos y/o giros diferenciales sin daños.

En las lumbreras, para disminuir los efectos de fricción negativa, generados por el HR es conveniente implementar varias juntas de expansión. Hasta la fecha estas juntas no se implementaron, pero es probable que se apliquen en las próximas generaciones.

Las juntas flexibles proporcionan la habilidad de giro sin la acumulación de esfuerzos y las de expansión permiten los desplazamientos a lo largo del eje de túnel sin la acumulación de esfuerzos a compresión. Los símbolos de este tipo de juntas se representan en la figura 92.

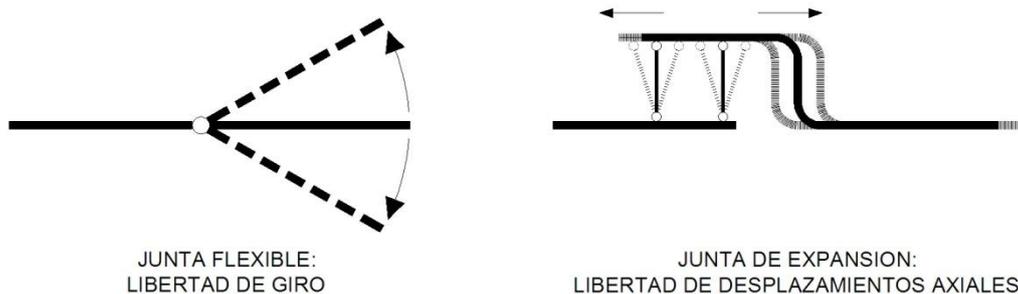


Figura 92. Junta flexible y de expansión.

3.3.2 Análisis de la estabilidad lumbrera-túnel durante la ocurrencia de los sismos

Durante la ocurrencia de los sismos, a través de la masa de suelo se propagan las ondas compresionales (longitudinales), volumétricas y/o de placa tipo Lamb, de cortante (transversales) y superficiales del tipo Raleigh y Love, con gran variedad de longitudes, periodos, direcciones y amplitudes máximas (figuras 93 Y 94).

En la figura 93 se indican los movimientos de los elementos de suelo (flecha roja) y la dirección de la propagación de las ondas (flecha azul).

La distribución de las ondas sísmicas por la litosfera es un fenómeno sumamente complejo y las teorías que interpretan estos fenómenos se encuentran en constante desarrollo. Por ejemplo, las ondas tipo Lamb, y superficiales, apenas, por su complejidad, recientemente están tomando importancia en la interpretación de los móviles destructivos de sismo, por su complejidad y similitud con otros tipos de ondas.

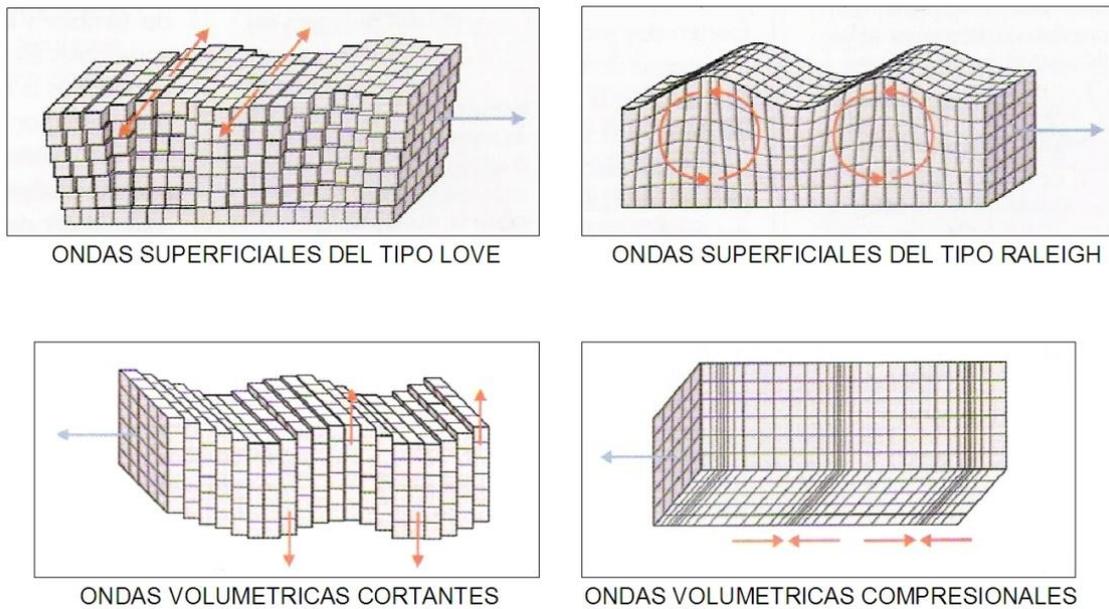
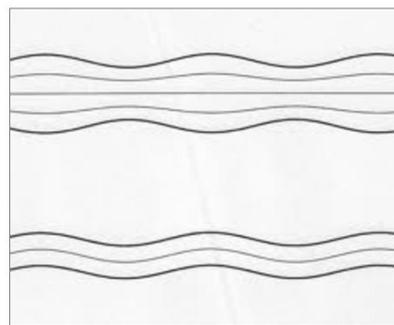


Figura 93. Ondas volumétricas y de superficie.



ONDAS VOLUMETRICAS O DE PLACA TIPO LAMB

Figura 94. Ondas de Lamb.

Las ondas que afectan a las estructuras subterráneas como son lumbreras y túneles son las que se amplifican y llegan a las máximas amplitudes de desplazamientos, velocidades y aceleraciones, registrados en sismogramas. La amplificación ocurre cuando una región de suelo con propiedades dinámicas similares¹ entra en resonancia. Durante el desarrollo del fenómeno de resonancia, las ondas sufren un pequeño

¹ Grupos de estratos de suelos blandos, de suelos rígidos, etc..

incremento de amplitudes en cada ciclo de oscilación. Después de una serie de ciclos de incrementos sucesivos las amplitudes llegan a su máximo de acuerdo con las características del amortiguamiento del medio de subsuelo y/o roca. También, las excitaciones sísmicas tienen su tiempo de duración que influye en la magnitud máxima de las amplitudes de ondas. Las deformaciones de suelo generadas por los sismos implican incrementos de esfuerzos. Cuando los esfuerzos sísmicos en la masa de suelo llegan a los límites de resistencia, en el mismo medio se generan las zonas de equilibrio plástico² y ocurren muchos tipos de colapsos de suelo y estructuras que pueden tener el desarrollo en ciclos de carga-descarga.

Las suposiciones de trabajo de análisis sísmico de las lumbreras están de acuerdo con las magnitudes de aceleraciones y desplazamientos sísmicos registrados en varias zonas del Valle de México, también de manera indirecta indicadas en el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, así como en las Normas Técnicas Complementaras.

Por otro lado, las lumbreras pertenecen a la familia de estructuras hidráulicas de la Ingeniería de Medio Ambiente. Las Normas que garantizan la calidad de este tipo de estructuras son, por ejemplo las de ACI 350, (referencia xvii) que se trabajan en conjunto con las Normas ASCE 7, donde se definen las condiciones y combinaciones de cargas (referencia xviii).

Las suposiciones de trabajo de análisis sísmico de lumbreras en suelos blandos son (referencia viii):

- Se considera que los desplazamientos sísmicos máximos de subsuelo se generan por las ondas cortantes. Se toma en cuenta el modo fundamental de vibración sísmica del subsuelo con su coeficiente de participación de 100%. Se entiende que la onda con las amplitudes máximas puede propagarse en todas las direcciones dentro de las formaciones de subsuelo con las propiedades mecánicas del mismo orden de magnitud (por ejemplo: suelos compresibles, suelos de muy baja compresibilidad, etc...).
- Lumbrera sigue los movimientos sísmicos de subsuelo.
- En cualquier configuración de desplazamientos sísmicos de subsuelo existe una forma deformada de la lumbrera que es resultado de la interacción suelo-estructura.
- Debido a los movimientos oscilatorios de la lumbrera, adicionalmente se generan las fuerzas inerciales en el cuerpo de la lumbrera que se transmiten al suelo y provocan una reacción a lo largo de la superficie de contacto lumbrera-suelo.

² Ondas elastoplásticas.

- Las fuerzas finales sísmicas en la lumbrera son la suma de los efectos de interacción suelo estructura por desplazamientos de suelo agregando los efectos de las fuerzas inerciales.
- Se buscan las posiciones más desfavorables de la onda sísmica que provocan las máximas deformaciones y máximas aceleraciones en la estructura de la lumbrera con el fin de encontrar las máximas fuerzas internas.

Se presenta un ejemplo de análisis sísmico de una lumbrera en suelos blandos tomando en cuenta la interacción suelo-estructura para la posición desfavorable de la onda cortante con respecto a la estructura de la lumbrera, tomado en cuenta las indicaciones del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal y sus Normas Técnicas Complementarias.

Selección de los desplazamientos sísmicos de subsuelo:

α) Máximo desplazamiento sísmico de la superficie de suelo:

De acuerdo con las NTCS³, cap. 3, Tabla 3.1 (referencia xix):

a_o = fracción de la aceleración de la gravedad de diseño por sismo que corresponde a $T=0.00$ s (representa a la estructura con el periodo fundamental igual a cero cuyos desplazamientos sísmicos son iguales que la superficie de suelo, con la rigidez muy alta y la masa muy pequeña), y que corresponde con la superficie de suelo=0.11, considerando que la lumbrera se encuentra en la zona III.

a_s = la aceleración de la superficie de suelo (de diseño)= $a_o g$

donde:

g =aceleración de la gravedad= $9.81 m/s^2$

entonces:

$$a_s = (0.11)(9.81) = 1.1 m/s^2$$

La lumbrera se considera como estructura del grupo A (RCDF, ARTICULO 139, referencia xx). De acuerdo con (NTCS, referencia xix, Cap. 1.5, ver figura 6, pag. 17) la aceleración sísmica se incrementa en 50 por ciento y se obtiene la aceleración máxima de la superficie del suelo (a_s^{max}) igual a:

$$a_s^{max} = 1.5 a_s = 1.1 * 1.5 = 1.65 m/s^2$$

El máximo desplazamiento de la superficie del suelo se obtiene de la expresión (Leonardo Zeevaert, Foundation Engineering for Difficult Subsoil Conditions, 1983, pag. 533, referencia viii.)

³ Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo

$$\bar{u}_{o1} = -\frac{a_m}{\omega_1^2} \quad (30)$$

Donde:

\bar{u}_{o1} = la amplitud de movimiento sísmico del suelo del 1er modo, metros

a_m = máxima aceleración sísmica de la superficie, m/s^2

ω_1 = frecuencia circular del movimiento sísmico del suelo, 1er modo, rad/s

T_1 = periodo fundamental de vibraciones sísmicas⁴ del suelo = 1.83 seg

La frecuencia circular o velocidad angular del movimiento sísmico del suelo se obtiene:

$$\omega_1 = \frac{2\pi}{T_1} = \frac{2\pi}{1.83} = 3.43 \frac{rad}{s} \quad (31)$$

De ω_1 se obtiene el desplazamiento sísmico máximo de la superficie⁵:

$$\bar{u}_{o1} = -\frac{a_m}{\omega_1^2} = -\frac{1.65}{3.43^2}$$

$$\bar{u}_{o1} = -0.14 \text{ m}$$

β) Configuración de la onda cortante en la zona del subsuelo blando (que cubre FAS, CD y FAI)

La forma de la onda cortante puede formularse con la expresión (referencia viii):

D = el espesor de suelos compresibles $\approx 50.00m$.

λ = la longitud de la onda sísmica $= 4 \cdot D = 4 \cdot 50 = 200m$.

ν_s = la relación de Poisson sísmica, considerando el suelo saturado con deformaciones volumétricas igual a cero = 0.5.

δ_{szy} = desplazamientos sísmicos en la dirección x-x como la función de las coordenadas “z” (profundidad) y “y” (distancia de un punto de referencia en la dirección de la propagación de la onda).

$\delta_s = \bar{u}_{o1}$ = desplazamiento sísmico en la superficie de suelo en la dirección de análisis en la dirección x-x como la función de las coordenadas “z” y “y”

z = profundidad del punto considerado a partir de la superficie de suelo.

y = dirección de la propagación de la onda cortante.

⁴ El periodo fundamental del subsuelo se calculó por medio de extrapolaciones de las resistencias del subsuelo obtenidas en pruebas de penetración de cono en el sitio del proyecto.

⁵ Se detectaron los máximos desplazamientos sísmicos de la superficie del orden de 20cm.

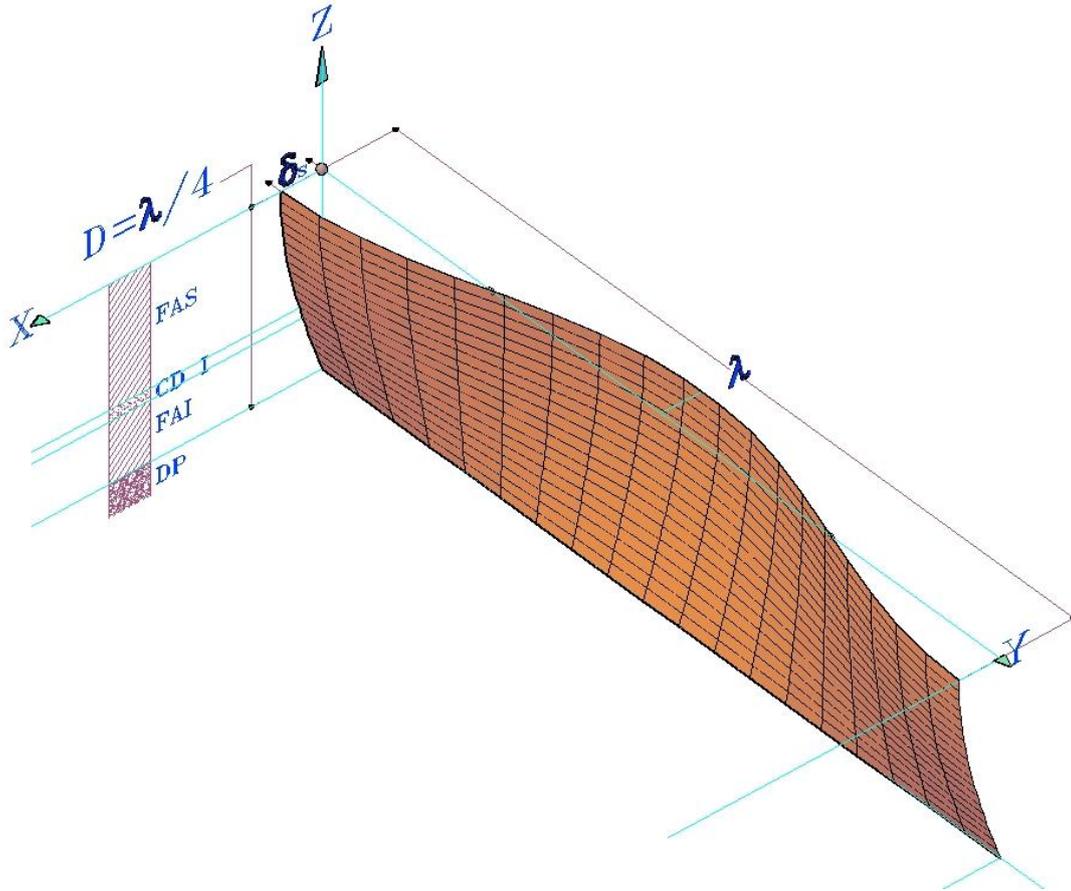


Figura 95. Configuración de la onda sísmica, periodo fundamental que se propaga por la zona de suelos blandos.

$$\delta_{szy} = \delta_s \cos\left(z \frac{2\pi}{\lambda}\right) \cos\left(y \frac{2\pi}{\lambda}\right) \quad (32)$$

Sustituyendo los valores del problema de la lumbrera se obtiene:

$$\delta_{szy} = 0.14 \cos\left(z \frac{2\pi}{200}\right) \cos\left(y \frac{2\pi}{200}\right) [m] \quad (33)$$

La imagen gráfica de la onda se presenta en la figura 95.

γ) Modelo estructural de análisis sísmico 3D de la lumbrera en subsuelo con la interacción suelo-estructura.

Se toma en cuenta una región de la masa de suelo de forma prismática que se extiende desde la superficie hasta los depósitos profundos. En los dos sentidos horizontales las dimensiones son iguales a la mitad de largo de una onda sísmica de cortante, $\lambda/2$ (figura 96).

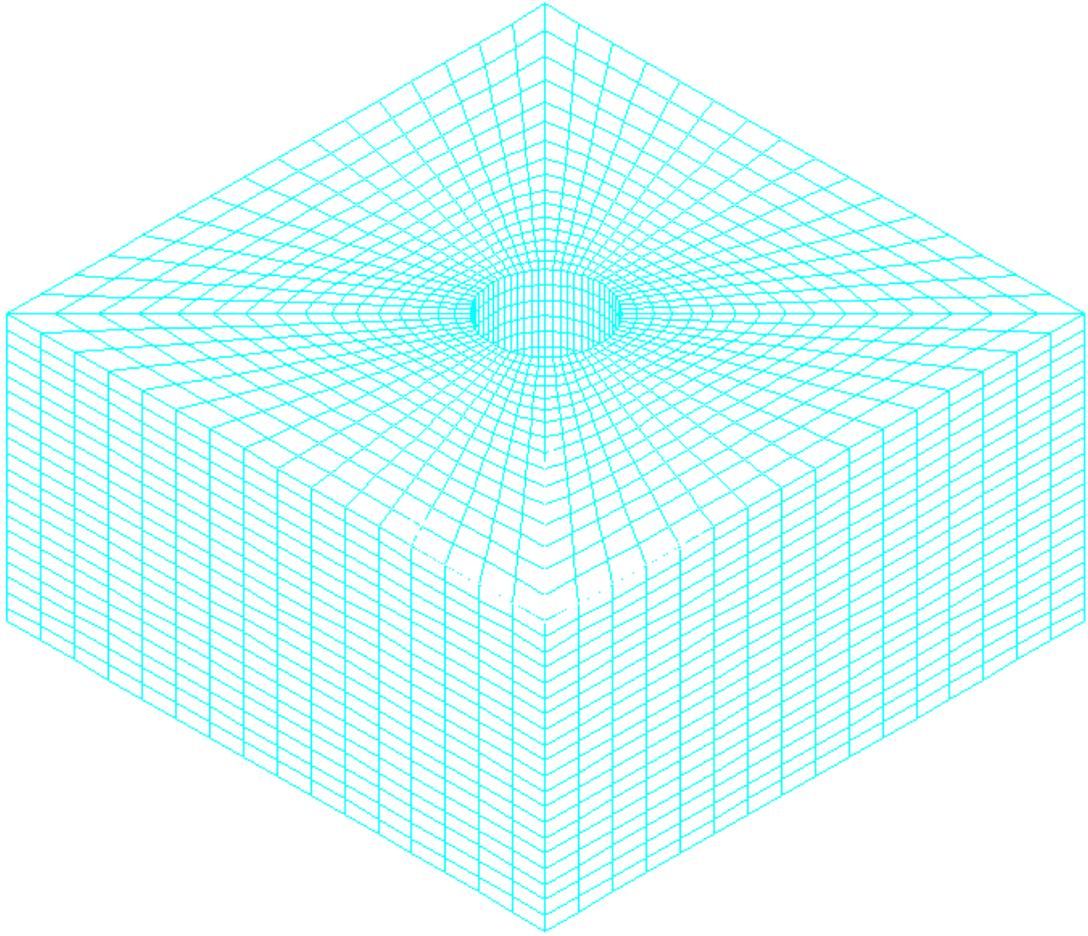
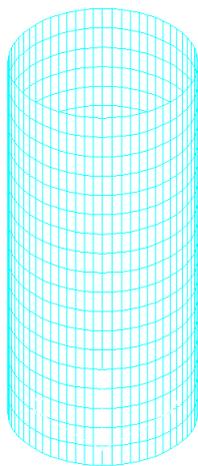
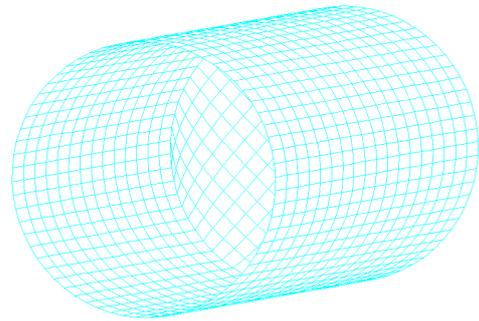


Figura 96. Modelo 3D para el análisis sísmico de interacción suelo-estructura.

En el centro de este prisma se ubica la estructura de la lumbrera. Se considera que las dimensiones del modelo son suficientemente grandes para que en las fornteras se pierda la influencia de la presencia de la estructura de lumbrera.



(a)



(b)

Figura 97. Modelo estructural de la lumbrera. Vistas en 3D.

El suelo se modeló (referencia xxi) con elemento tipo SOLID, que es un elemento tridimensional con 8 a 20 nodos para análisis de los problemas estructurales, donde se consideran tres grados de libertad por cada nodo. La orientación de las componentes de los esfuerzos se indican en la figura 98. En la figura 99 se indican los nodos, el sistema de coordenadas global y local del elemento, las posibles direcciones de las propiedades de los materiales ortogonalmente anisotrópicos y la convención de los números de las caras de borde del elemento para la aplicación de las cargas.

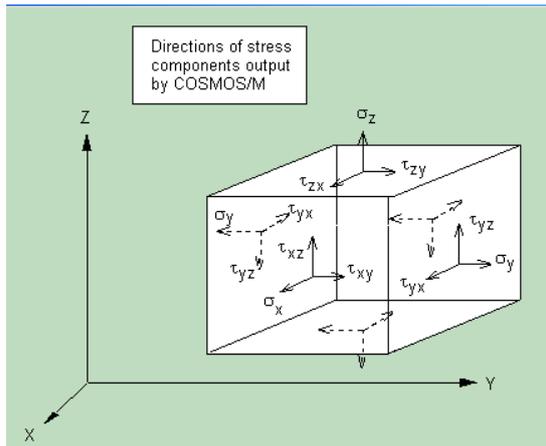


Figura 98. Orientación de los componentes de los esfuerzos.

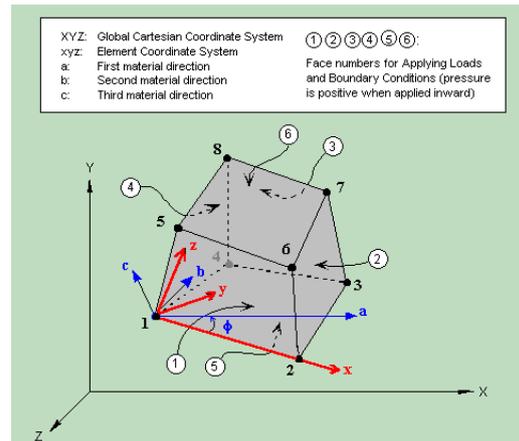


Figura 99. Convención de notaciones geométricas y de propiedades mecánicas del elemento.

La lumbrera se modeló con el elemento cascaron grueso, SHELL4T, de forma caudrilatera, con 4 nodos, que se utiliza para el análisis de modelos estructurales de tres dimensiones (figura 101).

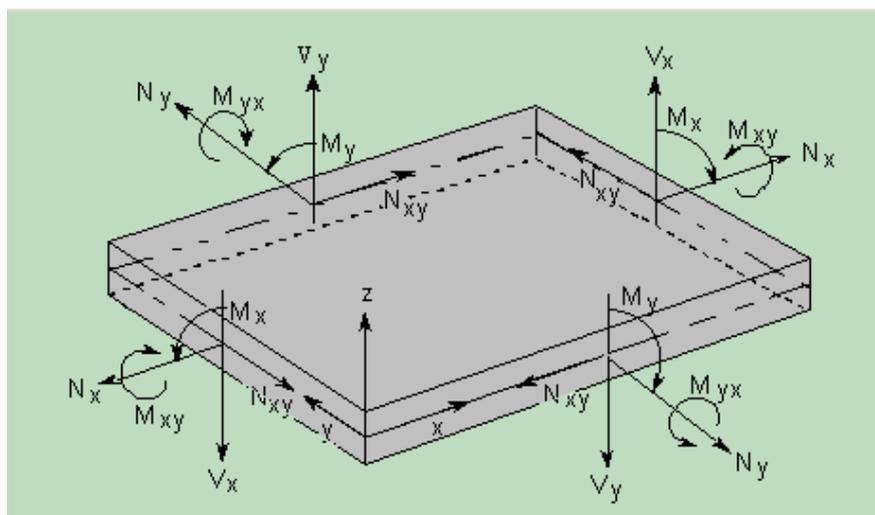


Figura 100. Las cargas que se obtienen como el resultado de análisis de elementos SHELL4T.

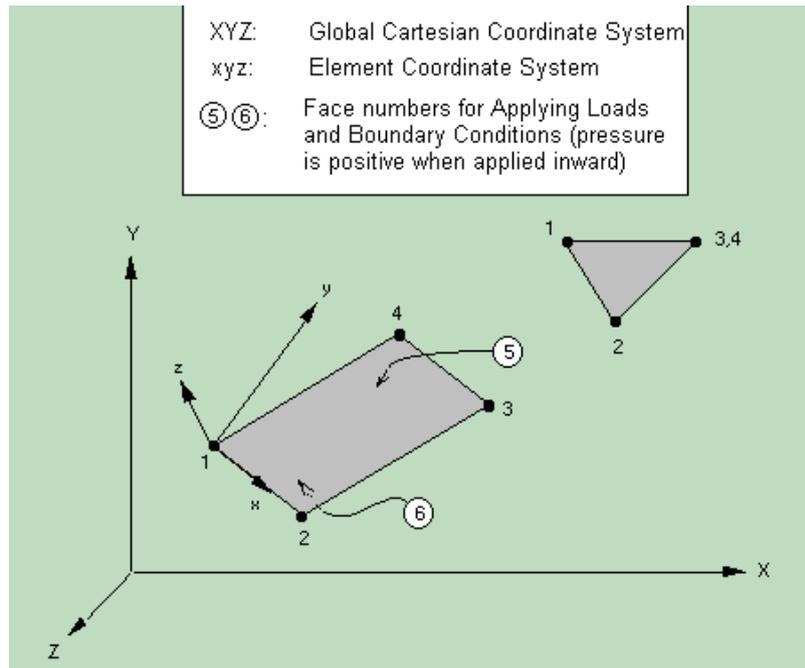


Figura 101. El sistema de coordenadas global y local del elemento, numeración de los nodos y el número de las caras del elemento SHELL4T para la aplicación de las cargas.

El elemento dispone de cálculo de deformaciones por cortante, que es una ventaja comparandolo con los elementos de cascaron delgado. Cada nodo dispone de seis grados de libertad: tres desplazamientos y tres giros. El material aplicado puede ser isotrópico u ortotrópico, pero con el espesor constante. Las fuerzas que se obtienen como el resultado de análisis se indican en la figura 100.

δ) El planteamiento de análisis de respuesta de lumbrera por los movimientos sísmicos del subsuelo

El análisis se realiza presentando los desplazamientos sísmicos a la masa de suelo como la condición de carga, y después, por medio de análisis se verifica la respuesta de la lumbrera⁶ respetando el equilibrio de las fuerzas y la compatibilidad de desplazamientos y deformaciones entre la lumbrera y la masa de suelo (referencia viii).

Respecto a la dirección de propagación de las ondas, igual que en el análisis de estructuras que emergen del subsuelo, las cargas y desplazamientos sísmicos se toman de la manera independiente en dos direcciones perpendiculares.

La solución se encuentra entre los dos extremos dependiendo de la rigidez de la estructura de la lumbrera en comparación con la compresibilidad y/o rigidez de la masa de suelo. En el caso de flexibilidad infinita de la lumbrera, esta estructura sigue desplazamientos de suelo y no presenta ningunas reacciones, y de esta forma no sufre de cargas internas como son fuerzas y momentos. En el otro extremo, la lumbrera con

⁶ Por medio de análisis de interacción suelo-estructura.

rigidez infinita, no sufre ningunas deformaciones o cambios de forma, lo que implica que las deformaciones y desplazamientos imposibilitados de suelo en las zonas de interfase suelo-lumbrera sean máximas, resultando las presiones y consecuentemente las cargas interiores maximas en la lumbrera. El análisis interacción suelo-estructura representa un caso intermedio entre estos dos extremos.

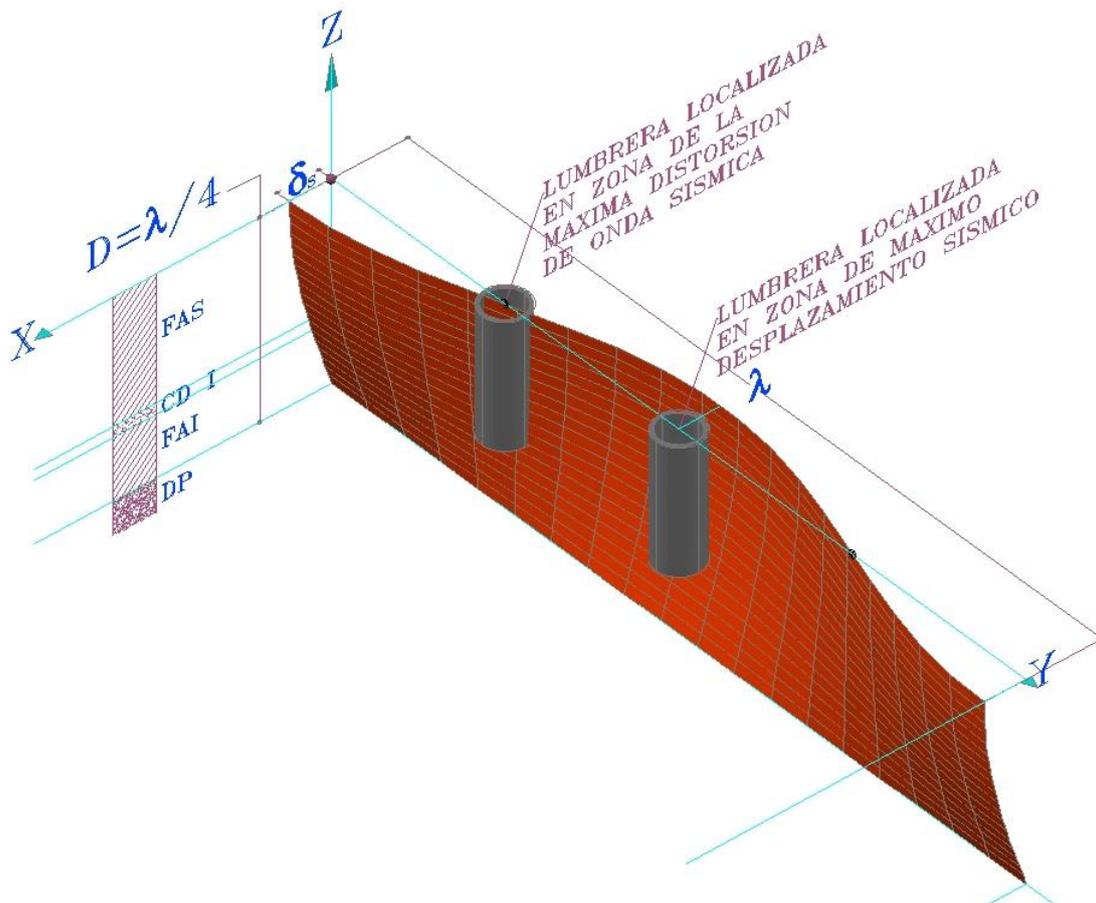


Figura 102. Dos casos críticos de la posición de la lumbrera en relación con la onda sísmica.

Las cargas máximas que se obtienen en la lumbrera dependen también de la posición de la lumbrera respecto a la geometría de la onda sísmica en el instante considerado. Se consideran dos casos críticos: lumbrera en la posición de máximo desplazamiento y en la posición de la máxima distorsión de la onda sísmica (figura 102).

ε) Resultados de análisis de respuesta sísmica de la lumbrera.

El análisis de interacción suelo-estructura de la respuesta sísmica de la lumbrera indica los siguientes resultados mas importantes:

- La máxima influencia de sismo es en el nivel de la superficie de suelo, y va disminuyendo con la profundidad (figura 102).

- La interacción suelo-estructura se desarrolla de acuerdo con la rigidez de la lumbrera. Por ejemplo en el extremo inferior, la presencia de losa de fondo incrementa sustancialmente la rigidez de lumbrera y el efecto sísmico (ovalamiento), es muy pequeño (figura 104).

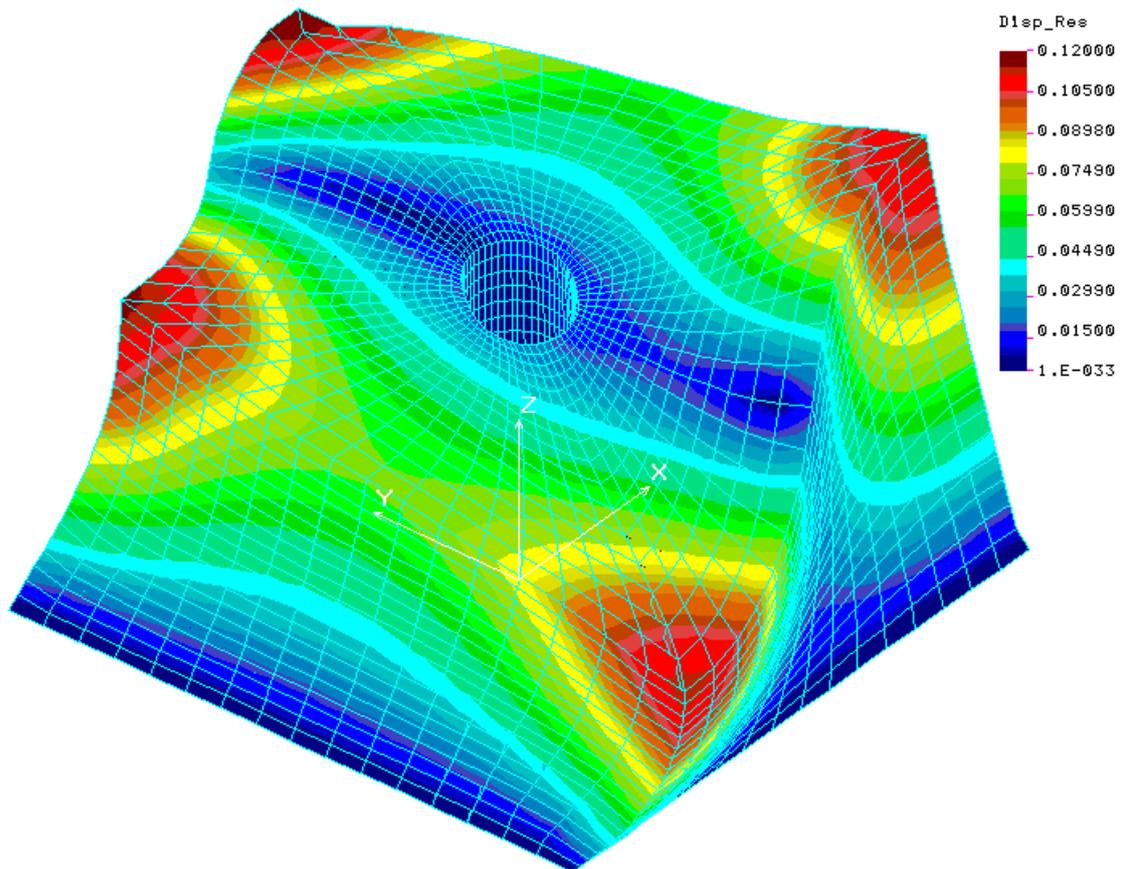


Figura 103. Distribución de los desplazamientos sísmicos alrededor de la lumbrera.

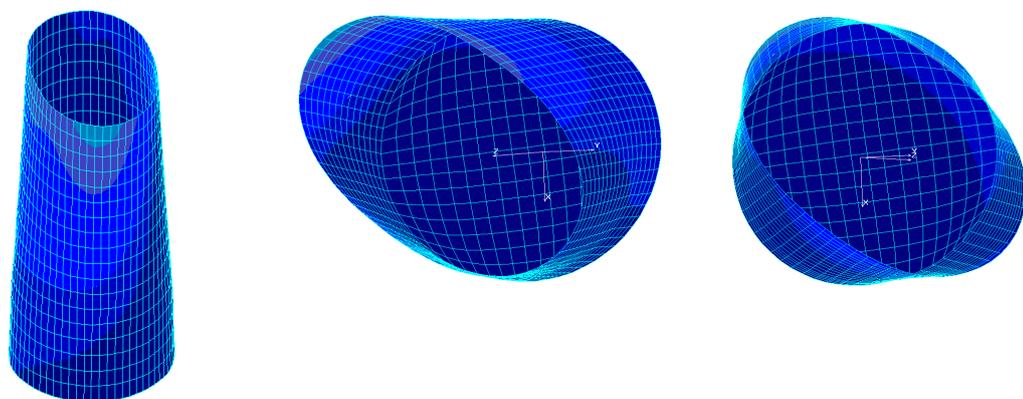


Figura 104. Varias vistas de los desplazamientos sísmicos de la lumbrera.

- La posición de la lumbrera más desfavorable es en el punto de inflexión de la onda sísmica (figura 105).

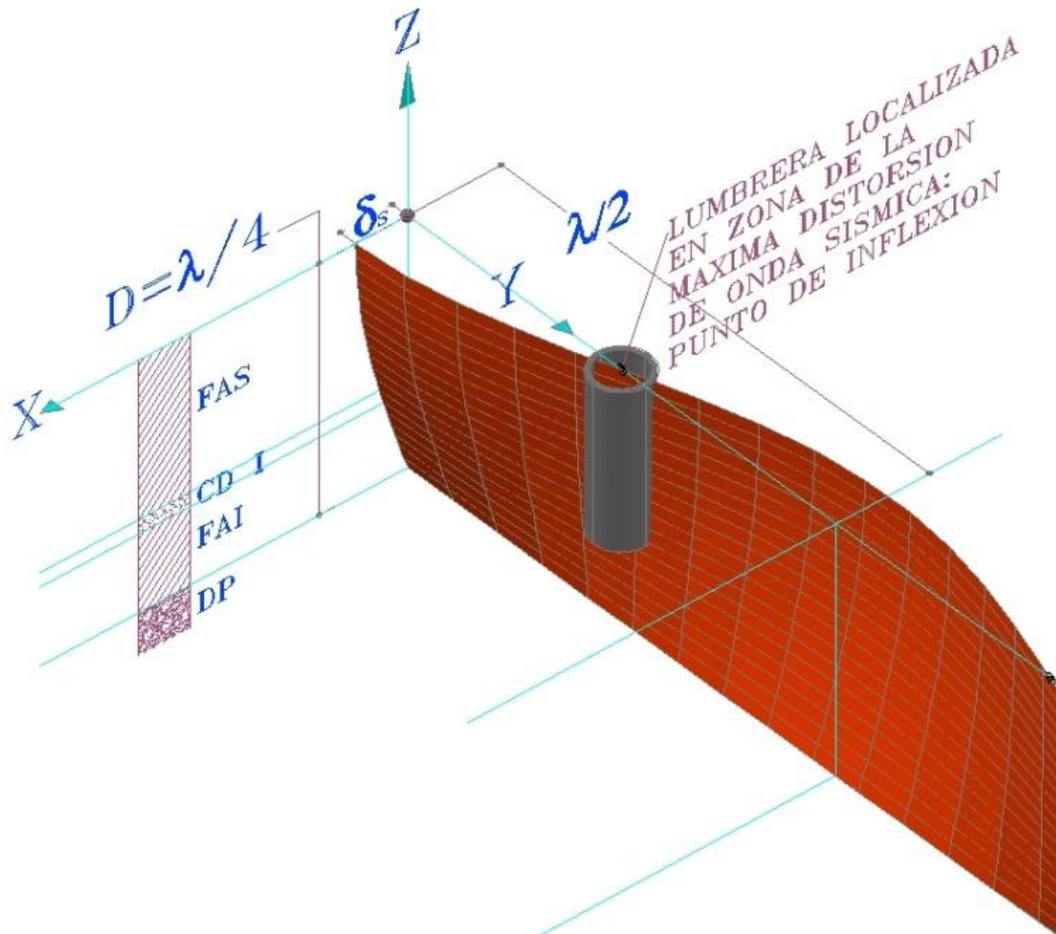


Figura 105. Posición desfavorable de la lumbrera en relación con la onda sísmica de cortante.

- De acuerdo con la regla de suma de efectos sísmicos en dos direcciones perpendiculares puede plantearse la posición de la onda sísmica de el sentido

perpendicular que incrementa los efectos por 50% (referencia xix, figura 106)

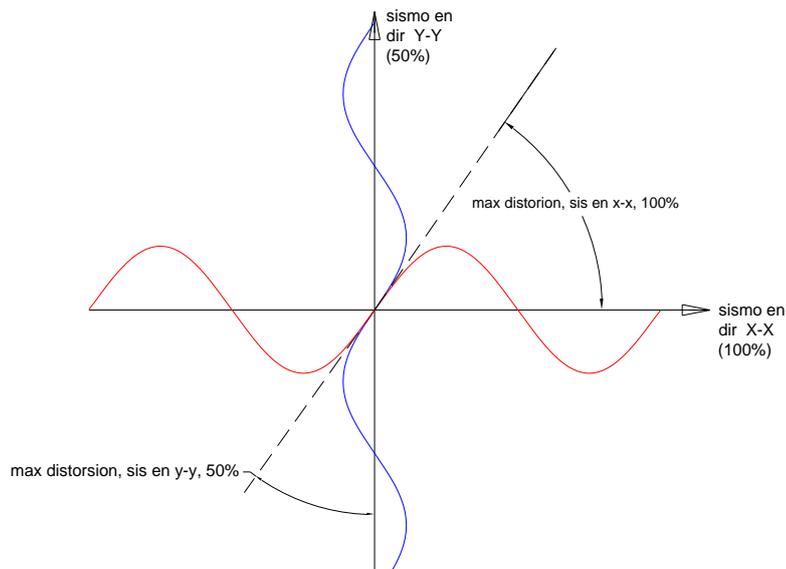


Figura 106. Superposición de los efectos sísmicos en las dos direcciones ortogonales.

- Los resultados de análisis indican que es necesario implementar el acero de refuerzo continuo en el sentido horizontal y vertical en las dos caras del muro cilíndrico de la lumbrera (figura 107).

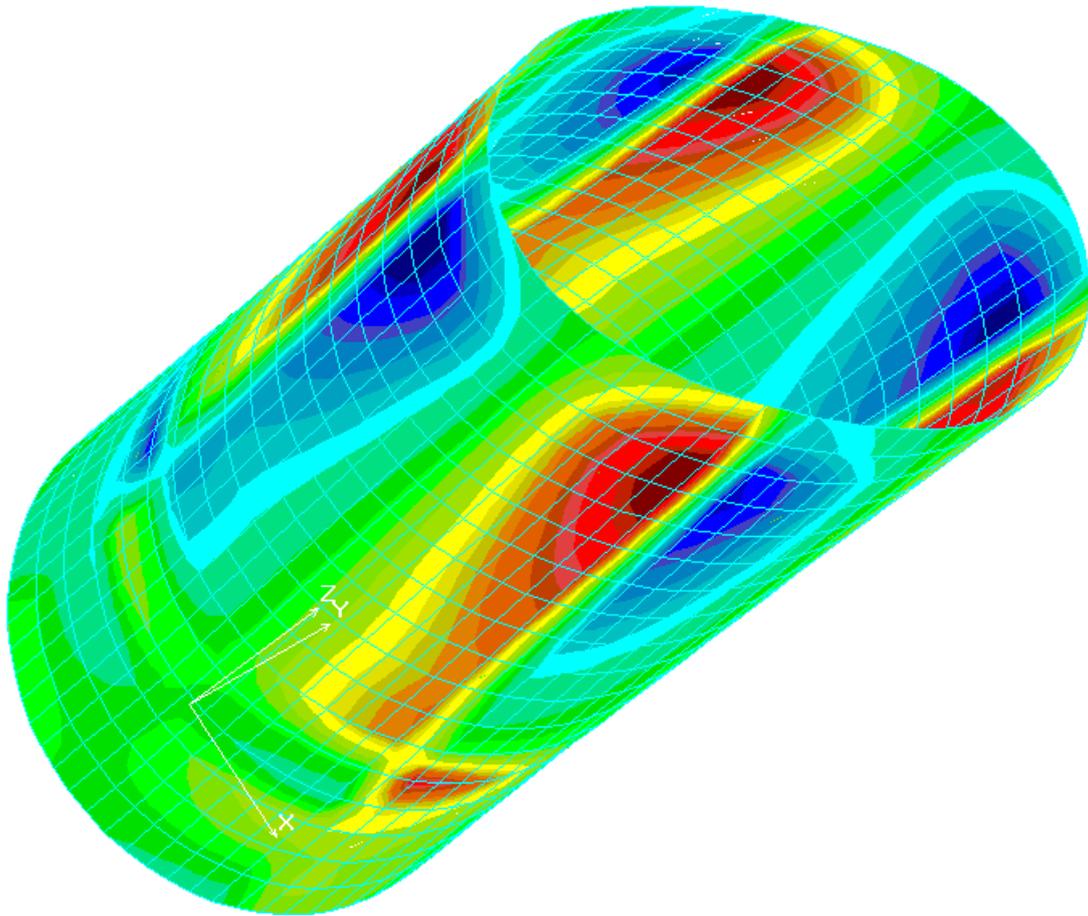


Figura 107. Distribución de los esfuerzos horizontales normales por flexión en la cara exterior de la lumbrera.

Los esfuerzos máximos indican la necesidad de aplicar el acero de refuerzo para soportar las cargas inducidas por el sismo de diseño. Puede notarse que la zona de esfuerzos máximos por flexión en el sentido horizontal se encuentra en la parte superior de la lumbrera, en la misma zona donde los esfuerzos benéficos a compresión por las cargas horizontales axialmente simétricas debidas a agua y suelo son mínimos.

4 Casos de lumbreras construidas por el método de anillos prefabricados

Durante la década de los ochentas y noventas se construyeron una serie de lumbreras con el procedimiento a base de anillos prefabricados para los túneles de Drenaje Profundo del Valle de México y las plantas de bombeo de aguas negras en la Zona de Lago del Valle de México. Los diámetros interiores típicos de las lumbreras terminadas construidas son de 5.00m para las captaciones, 12.00m para los túneles de Drenaje Profundo y hasta los 16.00m para las plantas de bombeo.

En algunas lumbreras para los Cárcamos de Bombeo y Lumbreras de rejillas se implementaron los pilotes penetrantes de tensión con resistencia a la fricción y de punta controlados con el propósito de lograr el empotramiento sísmico, la disminución de los desplazamientos diferenciales, y en contra de los empujes de supresión hidráulica en el nivel de fondo.

Se presenta una tabla de lumbreras construidas durante la década de los 90s de las cuales dos se proyectaron pero no se construyeron. Las lumbreras se ubican en la Zona de Lago y de Ex Lago de Xochimilco (ver tabla 7.).

Las situaciones típicas de problemas en las cuales se desarrollieron las obras son:

- La pérdidas repentinas de los niveles de los lodos bentoníticos en el interior de las excavaciones como consecuencia de la formación de las grietas radiales alrededor de las excavaciones.
- Acumulación de los azolves en el fondo de las excavaciones con lodos bentoníticos. Las paredes verticales de las excavaciones presentan una estabilidad con el tiempo limitado ya que el proceso de caídos y derrumbes de los bloques, fragmentos y/o granos de suelo de las paredes al fondo de la excavación es permanente. Es cuestión del tiempo relativamente corto cuando la cantidad de azolves acumulada en el fondo de la excavación puede impedir una construcción exitosa. En las lumbreras a base de anillos prefabricados, el intervalo de tiempo entre la última limpieza del fondo de la excavación y la colocación del primer anillo y el colado de la primera losa de fondo puede realizarse en unas cuantas horas, lo que es inferior que los días y meses en otros métodos convencionales.
- Las paredes verticales de forma cilíndrica de las excavaciones de lumbreras a veces tienen proyecciones de bloques de materiales de suelo que es difícil detectar y pueden obstruir el descenso de los anillos a su lugar de proyecto. En estos casos se retira el primer anillo del interior de la excavación, se elimina la obstrucción y se repite el descenso del anillo. Había casos de varios ciclos de retiro y descenso de anillos hasta la total eliminación de las obstrucciones.

- En el caso de estratigrafías contrastantes, como es el caso de la FAS subyacida por los depósitos rocosos en la zona de la losa de fondo de la lumbrera, se realizaron procedimientos combinados con los anillos prefabricados y excavación en roca.
- Los portales de salida y entrada de los escudos y/o tubos hincados han permitido e incremento de seguridad contra la extrusión de suelo al interior de la lumbrera, así como el significativo ahorro y aceleración de la obra ya que de esta manera se eliminaron los siempre cuestionados “mejoramientos de suelo” tanto en la zona de entrada y en la salida de túnel de la lumbrera.

No.	PROYECTO	TIPO DE ESTRUCTURA	DELEGACION	MUNICIPIO	FECHA	DIAMETRO INTERIOR DE LUMBRERA (M)	PROFUNDIDAD DE EXCAVACION (M)	PROFUNDIDAD DE LUMBRERA (M)	PROFUNDIDAD DEL EJE DE TUNEL O DEL TUBO HINCADO (M)	DIAMETRO INTERIOR DE TUNEL O DEL TUBO HINCADO (M)	OBSERVACIONES ESPECIALES
1	SISTEMA DE DRENAJE PROFUNDO. LUMBRERA L-4, INTERCEPTOR SEMIPROFUNDO CANAL NACIONAL CANAL DE CHALCO	LUMBRERA DE CAPTACION	COYDACAN		Ago-93	5.000	22.770	18.970	17.170	1.600	TUBO HINCADO DESDE LA LUMBRERA HASTA EL TUNEL
2	SISTEMA DE DRENAJE PROFUNDO. LUMBRERA L-5, INTERCEPTOR SEMIPROFUNDO CANAL NACIONAL CANAL DE CHALCO CIENAGA GRANDE	LUMBRERA DE CAPTACION	TLAHUAC		Ago-93	5.000	17.894	14.144	12.344	1.600	TUBO HINCADO DESDE LA LUMBRERA HASTA EL TUNEL
3	SISTEMA DE DRENAJE PROFUNDO. INTERCEPTOR ORIENTE, CAPTACION COLECTOR DE ALIVIO TASQUEÑA ENTRE JUAREZ Y CANAL NACIONAL	LUMBRERA DE CAPTACION	IZTAPALAPA		Sep-93	5.000	20.710	26.960	15.160	1.600	TUBO HINCADO DESDE LA LUMBRERA HASTA EL TUNEL
4	SISTEMA DE DRENAJE PROFUNDO. CAPTACION DE COLECTOR SANTA AN. INTERCEPTOR SEMIPROFUNDO CANAL NACIONAL CANAL DE CHALCO CIENAGA GRANDE	LUMBRERA DE CAPTACION	TLAHUAC		Sep-93	5.000	18.411	14.661	12.861	1.600	TUBO HINCADO DESDE LA LUMBRERA HASTA EL TUNEL
5	SISTEMA DE DRENAJE PROFUNDO INTERCEPTOR ORIENTE-SUR	LUMBRERA DE CAPTACION L-3	IZTAPALAPA		Oct-93	5.000	24.130	20.330	22.130	1.600	TUBO HINCADO DESDE LA LUMBRERA HASTA EL TUNEL DE ID-SUR
6	SISTEMA DE DRENAJE PROFUNDO. INTERCEPTOR ORIENTE-SUR. CAPTACION LUMBRERA L-3	LUMBRERA DE CAPTACION	IZTAPALAPA		Oct-93	5.000	24.074	20.324	18.522	1.600	TUBO HINCADO DESDE LA LUMBRERA HASTA EL TUNEL
7	SISTEMA DE DRENAJE PROFUNDO. INTERCEPTOR IGNACIONZARAGOZA Y AVENIDA GALINDO Y VILLA	LUMBRERA DE CAPTACION	V. CARRANZA		Jun-96	5.000	26.601	22.801	21.001	1.600	TUBO HINCADO DESDE LA LUMBRERA HASTA EL TUNEL
8	SISTEMA DE DRENAJE PROFUNDO. INTERCEPTOR ORIENTE, TRAMO LUMBRERA L-5 A LUMBRERA L-8, CAPTACION No. 2	LUMBRERA DE CAPTACION	V. CARRANZA		Jul-96	5.000	27.600	23.800	22.000	1.600	TUBO HINCADO DESDE LA LUMBRERA HASTA EL TUNEL
9	SISTEMA DE DRENAJE PROFUNDO. INTERCEPTOR RIO DE LOS REMEDIOS, OBRA DE CAPTACION PLANTA DE BOMBEO No. 10	LUMBRERA DE CAPTACION	G. A. MADERO	NEZAHUALCOYOTL Y ECATEPEC, EDO. MEX.	Dic-96	5.000	29.287	25.437	23.636	1.600	TUBO HINCADO DESDE LA LUMBRERA HASTA EL TUNEL
10	SISTEMA DE DRENAJE PROFUNDO. INTERCEPTOR RIO DE LOS REMEDIOS, OBRA DE CAPTACION No. 4	LUMBRERA DE CAPTACION		ECATEPEC	Dic-96	5.000	28.003	24.152	22.355	1.600	TUBO HINCADO DESDE LA LUMBRERA HASTA EL TUNEL
11	SISTEMA DE DRENAJE PROFUNDO CAPTACION No. 2 DE LOS COLECTORES CHURUBUSCO OCEANIA I Y II, AL TUNEL DE INTERCEPTOR ORIENTE	LUMBRERA DE CAPTACION	G. A. MADERO		Dic-96	8.000	24.770	21.650	19.500	2.440	TUBO HINCADO DESDE LA LUMBRERA HASTA EL TUNEL DE INTERCEPTOR ORIENTE
12	PLANTA DE BOMBEO DE AGUAS NEGRAS PARA EL RIEGO GRAN CANAL KM 27+500	LUMBRERA DE CARCAMO DE BOMBEO		DE CHICONAUTLA, EDO. MEX.	Jun-93	9.000	22.200	18.700			
13	SISTEMA DE DRENAJE PROFUNDO. PLANTA DE BOMBEO DE AGUAS NEGRAS Y COMBINADAS "RENOVACION 2"	LUMBRERA PARA EL CARCAMO DE BOMBEO		IZTAPALAPA	May-93	11.000					

14	SISTEMA DE DRENAJE PROFUNDO, PLANTA DE BOMBEO DE AGUAS NEGRAS Y COMBINADAS "RENOVACION 2"	LUMBRERA PARA LAS REJILLAS	IZTAPALAPA		May-93	11.000							
15	SISTEMA DE DRENAJE PROFUNDO, PLANTA DE BOMBEO DE AGUAS NEGRAS Y COMBINADAS "SAN LORENZO"	LUMBRERA PARA EL CARCAMO DE BOMBEO	TLAHUAC		Ene-94	11.000	17.200	13.200					POR DEBAJO DEL NIVEL DE LA EXCAVACION SE IMPLEMENTAN 16 PILOTES DE TENSION DE LARGO 27M. LARGO DE LA PERFORACION 27*2M PARA EL HR. DIAM. REF. 75CM. PILOTES CUADRADOS 40X40CM. LA PERFORACION SE LLENA CON LODO FRAGUANTES ANTES DE INSERCIÓN DE PILOTES.
16	SISTEMA DE DRENAJE PROFUNDO, PLANTA DE BOMBEO DE AGUAS NEGRAS Y COMBINADAS "SAN LORENZO"	LUMBRERA PARA LAS REJILLAS	TLAHUAC		Ene-94	11.000	17.200	13.200					POR DEBAJO DEL NIVEL DE LA EXCAVACION SE IMPLEMENTAN 16 PILOTES DE TENSION DE LARGO 27M. LARGO DE LA PERFORACION 27*2M PARA EL HR. DIAM. REF. 75CM. PILOTES CUADRADOS 40X40CM. LA PERFORACION SE LLENA CON LODO FRAGUANTES ANTES DE INSERCIÓN DE PILOTES.
17	SISTEMA DE DRENAJE PROFUNDO, INTERCEPTOR ORIENTE, LUMBRERA L-6	LUMBRERA PARA EL PASO DE TUNEL	G. A. MADERO		Nov-93	12.000	31.244	26.844	22.754	5.000			
18	SISTEMA DE DRENAJE PROFUNDO, INTERCEPTOR ORIENTE, LUMBRERA L-5 A	LUMBRERA PARA EL PASO DE TUNEL	G. A. MADERO		Abr-94	12.000	29.018	24.618	20.528	5.000			
19	SISTEMA DE DRENAJE PROFUNDO, INTERCEPTOR RIO DE LOS REMEDIOS, LUMBRERA L-2	LUMBRERA PARA EL PASO DE TUNEL		NEZAHUALCOYOTL Y ECATEPEC, EDO. MEX.	Nov-96	12.000	30.028	25.628	21.538	5.000			
20	SISTEMA DE DRENAJE PROFUNDO, INTERCEPTOR RIO DE LOS REMEDIOS, LUMBRERA L-3	LUMBRERA PARA EL PASO DE TUNEL		NEZAHUALCOYOTL Y ECATEPEC, EDO. MEX.	Nov-96	12.000	32.565	28.165	24.075	5.000			
21	SISTEMA DE DRENAJE PROFUNDO, INTERCEPTOR RIO DE LOS REMEDIOS, LUMBRERA L-4	LUMBRERA PARA EL PASO DE TUNEL		NEZAHUALCOYOTL Y ECATEPEC, EDO. MEX.	Nov-96	12.000	29.487	25.087	20.997	5.000			
22	SISTEMA DE DRENAJE PROFUNDO, INTERCEPTOR RIO DE LOS REMEDIOS, LUMBRERA L-5	LUMBRERA PARA EL PASO DE TUNEL		NEZAHUALCOYOTL Y ECATEPEC, EDO. MEX.	Nov-96	12.000	29.900	25.500	21.410	5.000			
23	SISTEMA DE DRENAJE PROFUNDO, INTERCEPTOR RIO DE LOS REMEDIOS, LUMBRERA L-6	LUMBRERA PARA EL PASO DE TUNEL		NEZAHUALCOYOTL Y ECATEPEC, EDO. MEX.	Nov-96	12.000	31.537	27.137	23.047	5.000			
24	SISTEMA DE DRENAJE PROFUNDO, PLANTA DE BOMBEO No. 7, CAPTACION PLANTA DE BOMBEO 7	LUMBRERA DE CAPTACION	G. A. MADERO		Dic-96	12.000	30.490	26.090	24.090	2.440			TUBO HINCADO DESDE LA LUMBRERA HASTA EL TUNEL DE INTERCEPTOR ORIENTE
25	SISTEMA DE DRENAJE PROFUNDO, INTERCEPTOR RIO DE LOS REMEDIOS, LUMBRERA L-1	LUMBRERA PARA EL PASO DE TUNEL		NEZAHUALCOYOTL Y ECATEPEC, EDO. MEX.	Dic-96	12.000	29.907	25.507	21.417	5.000			
26	SISTEMA DE DRENAJE PROFUNDO, INTERCEPTOR ORIENTE, LUMBRERA L-7	LUMBRERA PARA EL PASO DE TUNEL	G. A. MADERO		Feb-97	12.000	32.099	27.699	23.609	5.000			
27	SISTEMA DE DRENAJE PROFUNDO, PLANTA DE BOMBEO DE AGUA NEGRAS Y COMBINADAS DE 20M3SEG SANBUENA VENTRUA, LUMBRERA DE REJILLAS	LUMBRERA PARA REJILLAS	XOCHIMILCO		Ene-93	14.000	19.500	15.000					POR DEBAJO DEL NIVEL DE LA EXCAVACION SE IMPLEMENTAN 16 PILOTES DE TENSION DE LARGO 27M. LARGO DE LA PERFORACION 27*2M PARA EL HR. DIAM. REF. 75CM. PILOTES CUADRADOS 40X40CM. LA PERFORACION SE LLENA CON LODO FRAGUANTES ANTES DE INSERCIÓN DE PILOTES.
28	SISTEMA DE DRENAJE PROFUNDO, PLANTA DE BOMBEO DE AGUA NEGRAS Y COMBINADAS DE 20M3SEG SANBUENA VENTRUA, CARCAMO DE BOMBEO	LUMBRERA PARA CARCAMO DE BOMBEO	XOCHIMILCO		Ene-93	16.000	19.500	15.000					POR DEBAJO DEL NIVEL DE LA EXCAVACION SE IMPLEMENTAN 16 PILOTES DE TENSION DE LARGO 27M. LARGO DE LA PERFORACION 27*2M PARA EL HR. DIAM. REF. 75CM. PILOTES CUADRADOS 40X40CM. LA PERFORACION SE LLENA CON LODO FRAGUANTES ANTES DE INSERCIÓN DE PILOTES.
29	SISTEMA DE DRENAJE PROFUNDO, PLANTA DE BOMBEO DE AGUA NEGRAS Y COMBINADAS	LUMBRERA PARA REJILLAS		NEZAHUALCOYOTL Y ECATEPEC, EDO. MEX.	Nov-96	18.000	30.750	25.750					EN PROYECTO

	DE 40M3SEG PARA LA PLANTA DE TRATAMIENTO TEXCOCO, LUMBRERA DE REJILLAS										
30	SISTEMA DE DRENAJE PROFUNDO, PLANTA DE BOMBEO DE AGUA NEGRAS Y COMBINADAS DE 40M3SEG PARA LA PLANTA DE TRATAMIENTO TEXCOCO, CARCAMO DE BOMBEO	LUMBRERA PARA CARCAMO DE BOMBEO	NEZAHUALCOYOTL Y ECATEPEC, EDO. MEX.	Nov-96	22,000	30,750	25,750				EN PROYECTO

Tabla 7. Lista de las lumbreras realizadas (28) y las que quedaron en proyecto (2).

Puede notarse que el diámetro interior de las lumbreras construidas varía entre 5.0m hasta 16.0m, y la profundidad de excavación desde 17.20m hasta 32.565m. Los diámetros interiores más comunes son 5m y 12 m.

4.1 Lumbreras de pequeño diámetro interior de 5.0 metros, para las captaciones, donde las líneas de drenaje superficiales se conectan con el túnel de Drenaje Profundo

Las lumbreras de pequeño diámetro interior de 5.0m se proyectaron y construyeron como las estructuras auxiliares de Drenaje Profundo con el propósito de captar los gastos de los colectores superficiales y conducirlos al túnel.

Estas instalaciones siempre se construyen en la cercanía del túnel de drenaje profundo y en muchos casos se ubican en las zonas urbanas con alta densidad de instalaciones y estructuras vecinas como son las estaciones y líneas de Tren Urbano, cimentaciones profundas de edificios altos, cimentaciones de puentes, líneas de alta tensión, teléfono, etc. En estos ambientes de construcción cualquier tipo de consecuencias no deseadas como son las pérdidas de estabilidad y/o excesos de desplazamientos de suelo/instalaciones y estructuras, podría provocar daños de muy alto costo llegando a niveles de catástrofe. La seguridad en estas obras es de primera importancia, tanto durante la construcción como a largo plazo.

El procedimiento de construcción a base de anillos prefabricados de estas estructuras ha demostrado altos niveles de seguridad y funcionalidad a corto y largo plazo.

Los anillos prefabricados son de diámetro más pequeño utilizado. Como el peso de anillos es relativamente pequeño se aplicaron las alturas hasta los 4.00m, para disminuir el número de anillos requeridos.

En este tipo de lumbreras se implementó el sistema de tubo hincado para conectarse con el túnel, que es muy similar y se diseñó siguiendo los mismos principios como se indicó en la descripción del portal de salida y entrada de túnel a la lumbrera de Drenaje Profundo.

4.2 Lumbreras de diámetro interior intermedio de 12 metros, para la construcción y mantenimiento de túneles de Drenaje Profundo y como captación

Las lumbreras de 12m de diámetro se aplicaron predominantemente en las obras de túneles de Drenaje Profundo con el doble propósito:

- Estructura auxiliar en la construcción, operación y mantenimiento de túnel: para el transporte del personal, materiales y elementos estructurales de construcción, de equipo de construcción, de instalaciones de construcción y del material producto de la excavación.

- Como el conducto vertical para desalojar las aguas combinadas desde la superficie hasta el túnel.

Estas lumbreras, igual que las lumbreras pequeñas de 5.0m de diámetro, se ubican en las zonas urbanas con alta densidad de instalaciones y estructuras vecinas como son las estaciones y líneas de Tren Urbano, cimentaciones profundas de edificios altos, cimentaciones de puentes, líneas de alta tensión, teléfono, etc. En estos ambientes de construcción, cualquier tipo de fenómenos no deseados como son las pérdidas de estabilidad y/o excesos de desplazamientos de suelo/instalaciones y estructuras, podría provocar daños de muy alto costo llegando a niveles de catástrofe. La seguridad en estas obras es de primera importancia, tanto como durante la construcción como a largo plazo.

El procedimiento de construcción a base de anillos prefabricados de estas estructuras ha demostrado altos niveles de seguridad y funcionalidad.

Las áreas disponibles en los sitios de las obras eran suficientemente grandes. En todos los casos, de acuerdo con la conveniencia de las constructoras, los anillos se construyeron en su forma completa, antes de su inserción en el interior de la excavación.

Es importante mencionar que en el caso de las áreas de superficies de obra reducidas es posible configurar los anillos a base de ensamble de los elementos prefabricados por arriba de la excavación, de manera similar como se forman los anillos de dovelas en el interior de escudo durante la construcción de túneles. De esta manera puede evitarse el uso de grúas de grandes capacidades (40.0t-50.0t, en condiciones de pluma extendida a 6m-8m) y sustituirlas con las pequeñas de capacidad entre las 8.0t a 16.0t con la extensión de pluma entre 1.5m y 3.0m. Otra ventaja es la posibilidad de producción de las dovelas en una planta y su transporte al sitio de la obra. Estos elementos podrían reducir significativamente los costos de producción y montaje de los anillos prefabricados.

4.3 Lumbreras de grandes diámetros, mayores de 16 metros para las lumbreras de rejillas y los cárcamos de bombeo de las plantas de bombeo de aguas negras con capacidades a partir de los 20 m³/s hasta los 80m³/s.

Las lumbreras de diámetros mayores de 12.0m se utilizan en las plantas de bombeo de aguas combinadas con las capacidades hasta los 40m³/s (80m³/s) situadas en la Zona de Lago del Valle de México.

En el inicio de desarrollo de grandes plantas de bombeo, las estructuras como son las de captación, de rejillas, el tanque de carga con la estructura de descarga y el cárcamo de bombeo se conceptualizaron en forma de prismas rectangulares alargadas. Estas formas mostraron un comportamiento indeseado ya que desde su temprana edad empezaron a sufrir

de desplazamientos diferenciales que provocaron significantes problemas tanto en el servicio como en la estabilidad de varios elementos estructurales y de instalaciones:

- Fallas en las juntas flexibles, permitiendo las fugas de agua hasta el nivel de cortos circuitos entre el tanque de carga y el cárcamo de bombeo.
- Pérdida de horizontalidad de los apoyos de las grúas viajeras y consecuente cancelación de su servicio.
- Agrietamientos excesivos de varios elementos estructurales integrados al cárcamo de bombeo como son las columnas, trabes, diafragmas, así los daños en los elementos no estructurales como son ventanas, puertas, etc.
- Es importante concluir que en varios intentos de reparaciones de estas plantas, la construcción de nuevas plantas a base de estructuras más eficientes, resultaba más económica.

De acuerdo con el comportamiento inapropiado de las estructuras subterráneas de primeras plantas de bombeo de aguas combinadas de forma rectangular, se procedió con los proyectos de cárcamos de bombeo de forma circular, así como de otras estructuras acompañantes como son el tanque de carga, lumbrera de captación y de rejillas. Las lumbreras circulares en estas plantas de bombeo mostraron el comportamiento más satisfactorio gracias a la forma axisimétrica tanto en la geometría como en las cargas.

Este concepto de estructuras subterráneas circulares se llevó a cabo en varias plantas de bombeo como son por ejemplo: Riachuelo Serpentino, Río Churubusco, Renovación 2, San Buenaventura, Lago Salado, San Lorenzo, Zaragoza 1, etc.

También se realizó el proyecto ejecutivo de la planta de bombeo de aguas combinadas El Texcoco de capacidad de $80\text{m}^3/\text{s}$ con el máximo diámetro interior de la lumbrera de 22.0m.

Es conveniente indicar que las plantas de bombeo mencionadas tienen el tanque de carga integrado a la lumbrera de cárcamo de bombeo en su parte superior para evitar los desplazamientos diferenciales y otros fenómenos como es el hundimiento regional, sismos, y los relacionados con el material de concreto como es la contracción y el flujo plástico.

Las lumbreras de grandes diámetros tienen implementados los pilotes penetrantes de fricción para evitar los desplazamientos ascendentes por supresión hidráulica, proporcionar el empotramiento durante los sismos y evitar los giros de lumbreras por las cargas asimétricas debidas a la geometría de tanque de carga. También es importante mencionar los efectos de los cambios extraordinarios de cargas por el llenado y vaciado rápido de tanque de carga y del agua en el interior de las lumbreras que llegan a las magnitudes del orden de $7,000t$ a $10,000$.

Las lumbreras de las plantas de bombeo siempre son ligadas a las tecnologías de tubo hincado y recepción y/o terminación del túnel con el escudo. Estos dos problemas se resolvieron de la manera eficiente con el portal de entrada/salida de escudo y el método similar de hincado/recepción del tubo de tramos cortos de diámetros desde los 1.6m hasta los 6.0m en las profundidades de la construcción del túnel.

5 Conclusiones

5.1 El grado de seguridad

Las lumbreras a base de anillos prefabricados han demostrado una seguridad de alto grado. No se había presentado alguna falla tanto durante el proceso de construcción como durante el periodo de la vida útil.

Durante la obra se presentaron una serie de problemas como son:

- Durante la maniobra de inserción del primer anillo se presentaron obstrucciones debidas a las proyecciones o protuberancias del material de suelo en las paredes cilíndricas de la excavación. En estos casos, el primer anillo se retiraba del interior de la excavación y con el equipo de excavación se retiraba el obstáculo. En algunos casos el primer anillo tenía que retirarse hasta tres veces hasta lograr el libre paso a su posición de proyecto.
- El más difícil de los problemas ocurridos es en el caso de estratigrafías imprecisas donde, en el nivel superior de la losa de fondo se encontró una unidad estratigráfica de roca calcárea producto de sedimentación hidrotermal, subyaciendo la FAS. En este caso se eliminó el uso de primer anillo con la estructura de acero en forma de estrella. La zona de contacto entre el segundo anillo y la superficie de roca se inyectó con el método “a manguito”. La excavación en roca, para alojar la losa de fondo definitiva se realizó después de retirar los lodos bentoníticos del interior de la lumbrera. En continuación, lumbrera se construyó de acuerdo con el proyecto.
- Durante el colado de la losa de fondo primaria por medio de tubos Tremie, en una lumbrera de diámetro de 16m, el nivel de colado resulto en algunas zonas por encima del nivel de proyecto. El concreto simple de la losa de fondo primaria tenia el refuerzo secundario a base de micro fibras de nylon que proporcionaron una alta resistencia a tensión al mismo concreto. La demolición o fragmentación de este tipo de concreto se realizó por medio de la reacción lenta (24horas) de material expansivo rellenando las series de perforaciones entrelazadas. El uso de martillos neumáticos resultó en la demolición muy lenta y ineficiente para este tipo de concreto.

5.2 La importancia de la eliminación de la restitución de suelo natural con el mortero en las zonas de salida y entrada de los escudos o tubos hincados a las lumbreras

La restitución de suelo natural con el mortero en las zonas de entrada y salida de escudos (“el mejoramiento”) mostraba problemas intrínsecos, característicos en obras ocultas, donde es muy difícil de realizar el control de calidad de procedimiento y de materiales como son: la resistencia de los materiales y su continuidad a partir de la superficie hasta unos 3.0m a 7.0m por debajo de la cubetas de túnel. Estos problemas se manifestaron varias veces provocando las fallas por extrusión de las arcillas en los instantes de paso de escudo atravesando el muro de la lumbrera.

Con la implementación del portal de salida/entrada de escudo y/o tubo hincado se:

- Eliminó el problema de extrusión de arcillas, logrando mayores grados de seguridad.
- Las infiltraciones de agua subterránea al interior de la lumbrera se redujeron a pequeñas cantidades con el sello de hule.
- Se eliminaron los costos tanto en la restitución de suelo natural con el mortero, así como en las inyecciones para complementar la continuidad del “mejoramiento” que son comparables con el costo de toda la lumbrera.
- Se aceleró la obra de construcción del túnel evitando la espera por la construcción y fraguado del “mejoramiento”.

5.2 La rapidez de la obra de construcción

Con la construcción de las lumbreras con los anillos prefabricados se aceleró significativamente la obra.

Después de la terminación de la excavación, la colocación de los anillos prefabricados, el colado de la losa de fondo primaria y del relleno perimetral normalmente dura máximo 2 días. A partir de este instante pueden retirarse los lodos bentoníticos del interior de la lumbrera y proceder con la construcción del revestimiento definitivo. La losa de fondo definitiva implica la colocación del acero de refuerzo (previamente preparado) y el colado. El muro cilíndrico de la lumbrera incluye la colocación de acero de refuerzo, instalación de la cimbra deslizante y el colado del muro con una velocidad de 1.0m a 2.0m por hora. Finalmente la construcción de los portales implica previa instalación de la estructura de acero, colado de mortero del interior del portal y colocación del sello de hule con placas diafragma.

5.3 Los ahorros y los factores económicos que rigen las lumbreras de los anillos

Los ahorros y la rapidez son significantes factores en la elección del procedimiento constructivo de las lumbreras. Pueden ahorrarse hasta los 30% a 40% del costo comparándolo con otros métodos de construcción.

5.4 Sencillez del procedimiento para las compañías constructoras sin tecnologías, experiencias y maquinaria altamente sofisticadas

Un factor socio-económico de las lumbreras a base de anillos prefabricados es que no requiere de Constructoras de alto nivel tecnológico y de experiencias especializadas. En muchos casos, las obras fueron realizadas por las compañías sin previas experiencias en lumbreras, que las terminaron de acuerdo con los requerimientos de proyecto.

5.5 Utilización de las lumbreras construidas por el método de anillos en otros tipos de proyectos

Las lumbreras con este procedimiento podrían utilizarse en un gran variedad de la obras que incluyen excavaciones profundas en suelos blandos: cimentaciones de estructuras pesadas con grandes variaciones de carga como son las planta de tratamiento de aguas, edificios altos, cimentaciones de puentes, estructuras industriales, etc.

REFERENCIAS:

i MARSAL, R. J., y MAZARI, M., 1959. El Subsuelo de la Ciudad de México. Primer Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos y Cimentaciones, México, D.F. Publicación repetida en 1969 con la traducción en inglés.

ii AUVINET, G., 2006, Notas del curso de Mecánica de Suelos Aplicada, Programa de Estudios de Posgrado en Ingeniería, Facultad de Ingeniería, UNAM.

iii MORENO FERNANDEZ, A., 1991, Lumbreras y Túneles en Suelos, Trabajo de Ingreso a la Academia de Ingeniería de México.

iv ZEMVA, S. T., 1988-2002, Proyectos Ejecutivos de las 30 Lumbreras del Sistema de Drenaje Profundo realizados para el Departamento del Distrito Federal,

v PECK, R. B., 1969, Deep Excavations and Tunneling in Soft Ground, State of Art, Conferencia Internacional de Mecánica de Suelos y Cimentaciones, La Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos,

vi US ARMY CORPS OF ENGINEERS, ENGINEERING AND DESIGN, 2001, Geotechnical Investigations, Engineering Manual, EM 1110-1-1804,

vii TERZAGHI, K., 1943, Theoretical Soil Mechanics, John Wiley And Sons, Inc.

viii ZEEVAERT, L. W., 1983, Foundation Engineering for Difficult Subsoil Conditions, Second Edition, Van Nostrand Reinhold Company, New York.

ix XANTHAKOS, P. P., 1979, Slurry Walls, McGraw-Hill.

x AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS, ASTM C270-10, Standard Specification for Mortar for Unit Masonry.

xi INTERNATIONAL CONFERENCE OF BUILDING OFFICIALS, 1997, Uniform Building Code,

xii INTERNATIONAL CODE COUNCIL, INC., 2003 International Building Code®, 2003,

xiii SECRETARIA DE COMERCIO Y FOMENTO INDUSTRIAL, NORMA MEXICANA NMX-C-061-1976, Determinación de la Resistencia a la Compresión de Cementantes Hidráulicos.

xiv SHOFIELD, A. and WROTH, P., 2002, Critical State Soil Mechanics, Cambridge University.

xv Auvinet, G., Rodriguez, J. F., 2010, Análisis, diseño, construcción y comportamiento de obras subterráneas en suelo, XXV Reunión Nacioal de Mecánica de Suelos e Ingeniería geotécnica, Acapulco, Gro.

xvi SACM, Sistema de Aguas de la Ciudad de México, 2005, Gobierno del Distrito Federal, Mapa de las Curvas de Igual Hundimiento Regional Anual Promedio del Valle de México de 1995 a 2005.

xvii ACI COMMITTEE 350, 2006, CODE REQUIREMENTS FOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING CONCRETE STRUCTURES AND COMMENTARY, (ACI 350-06).

xviii AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS, 2005, Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures,

xix GOBIERNO DEL DISTRITO FEDERAL, 2004, Normas Técnicas Complementarias Para Diseño Por Sismo,

xx GOBIERNO DEL DISTRITO FEDERAL, 2004, Reglamento De Construcciones Para El Distrito Federal,

xxi STRUCTURAL RESEARCH AND ANALYSIS CORPORATION, COSMOS/M, 1995, General Finite Element Analysis Software,