



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**“MANUAL DE MANTENIMIENTO DEL DRENAJE
PROFUNDO: LUMBRERA L8A-L8B”**

T É S I S
Qué Para Obtener el Título de
INGENIERO CIVIL
P R E S E N T A
JOSÉ LUIS MORALES MUÑOZ

DIRECTOR DE TESIS:
ING. JOSÉ MANUEL BAHAMONDE PELÁEZ



Ciudad Universitaria México, D.F.

2014

A MIS PADRES Y MIS HERMANOS QUE SIEMPRE ME HAN APOYADO, QUE HAN ESTADO EN LOS MOMENTOS MAS DIFICILES Y QUE HOY ME HAN HECHO LO QUE SOY.

A PAOLA, POR QUE EN ESTA ESTAPA FINAL, HAS SIDO UN GRAN APOYO.

A MIS PROFESORES QUE ME HAN AYUDADO A CRECER DENTRO DE ESTA GRAN UNIVERSIDAD

A TODAS LAS PERSONAS QUE CONTRIBUYERON CON MI FORMACIÓN, PERSONAL, ACADEMICA Y PROFESIONAL

INDICE

CONTENIDO	PAGINA
INTRODUCCIÓN	
CAPÍTULO I DRENAJE PROFUNDO Y OBRAS COMPLEMENTARIAS	
DRENAJE PROFUNDO.....	6
EMISOR	
Emisor Central.....	7
Emisor Poniente.....	8
INTERCEPTOR.....	9
GRAN CANAL.....	14
OBRA DE TOMA.....	16
LUMBRERA.....	17
COLECTOR.....	18
PRESA.....	18
CAPÍTULO 2	
HISTORIA DEL DRENAJE PROFUNDO	
PLANTEAMIENTO.....	20
ESTUDIOS Y PROYECTOS.....	24
ESTUDIOS HIDROLOGICOS E HIDRAULICOS.....	27
GEOLOGIA	
PLANEACIÓN y PREPARACIÓN.....	32
EJECUCIÓN.....	37
ESTRATIGRAFÍA.....	41
INSTRUMENTACIÓN.....	50
DISEÑO.....	53
CONCRETO.....	64
ADITIVO.....	65

CAPÍTULO 3

EVALUACIÓN DEL DRENAJE PROFUNDO (DF)

EVALUACION.....	70
TIPO DE DAÑOS.....	78
Daño Tipo 1.....	79
Daño Tipo 2.....	80
Daño Tipo 3.....	81
Daño Tipo 4.....	82
Daño Tipo 5.....	83

CAPITULO 4

MANTENIMIENTO (REVESTIMIENTO) DEL DRENAJE PROFUNDO LUMBRERA L-8A

MANTENIMIENTO PREVENTIVO.....	85
MANTENIMIENTO CORRECTIVO.....	91
RED DE DRENAJE.....	92
PRUEBAS DE LIMPIEZA.....	93
HIDRODEMOLICIÓN.....	95
HIDROESCARIFICADO.....	96
ACERO.....	101
CIMBRA.....	106
CONCRETO.....	111
RECUBRIMIENTO PARA PROTECCIÓN DEL CONCRETO CONTRA ATAQUE DE GASES.....	124

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES.....	126
-------------------	-----

ÍNDICE FOTOGRÁFICO.....	128
ÍNDICE ESQUEMAS.....	132
GLOSARIO.....	133
BIBLIOGRAFÍA.....	135

INTRODUCCIÓN

El Sistema de Drenaje Profundo (SDP) es parte importante de la historia hidráulica de la Ciudad de México de finales del siglo XX. Ante una mancha urbana en permanente crecimiento y la infraestructura de drenaje superficial disminuida en su capacidad, el drenaje profundo es la más acertada alternativa para el desalojo oportuno de grandes volúmenes de agua pluvial.

Así, el drenaje profundo no requiere de bombeos debido a que funciona por gravedad y no es afectado por los hundimientos del subsuelo. Además fue diseñado para aprovechar la infraestructura primaria existente, la cual, por otra parte, se ha ampliado y conservado para garantizar a la población su seguridad contra las inundaciones.

El SDP se ha construido por etapas, la primera de ellas cubrió la construcción del Emisor Central y los primeros tramos de los Interceptores Central y Oriente, inició en 1967 y se terminó con su puesta en operación en 1975.

A partir de 1975, el SDP se convirtió en uno de los componentes más importantes del sistema de desagüe. Consta de varios interceptores que fluyen hacia un mismo conducto para evacuar las aguas denominado Emisor Central.

Desde su diseño e inicio de operación, el funcionamiento del Sistema de Drenaje Profundo estaba previsto exclusivamente para la época de lluvias, destinándose los estiajes para llevar a cabo su inspección y mantenimiento requerido. Se consideraba que las inspecciones y reparaciones se realizarían con los túneles secos, sin embargo el hundimiento regional del terreno, producto de la sobreexplotación del acuífero, provocó la pérdida de la capacidad de desalojo de los Grandes Drenes Superficiales, motivo por el cual el Sistema de Drenaje Profundo ha tenido que operar en épocas de estiaje, conduciendo aguas residuales y ocasionalmente aguas de lluvia producto de tormentas fuera de temporada.

La Ciudad de México, durante su pujante desarrollo después de 1930, al mismo tiempo que hacía la construcción de constantes obras para evitar inundaciones, había estado realizado obras para extender los servicios de agua y alcantarillado, aunque esto lo hacía en sólo fracciones de las nuevas zonas habitadas que por todos los rumbos se establecían, al crecer la superficie poblada más rápidamente que la red de servicios urbanos. Por otro lado, el desquiciamiento del sistema de drenaje con el fenómeno del hundimiento y la sobre capacidad por el aumento imprevisto del área servida, creaban serios problemas para el desagüe de la urbe.

Las inundaciones acaecidas en 1950, advirtieron la urgencia de un sistema energético de bombeo dado el dislocamiento del alcantarillado y el hundimiento del Gran Canal. Este ingente problema, aunado al del hundimiento del terreno y

abastecimiento de agua potable, requería urgente y radical solución. Para tal objeto en el año de 1953, el Presidente de la República, Adolfo Ruíz Cortines, autorizó la creación de la Dirección General de Obras Hidráulicas como una dependencia técnica del Departamento del Distrito Federal.

Para resolver los problemas en forma definitiva, en el mes de mayo de 1954 la Dirección formuló el "Plan General para Resolver los problemas del Hundimiento, las Inundaciones y el Abastecimiento de Agua Potable de la Ciudad de México", basado en los datos hasta entonces disponibles, programando la sucesión de obras definitivas para los siguientes 25 años.

Dicho plan fue la base para realizar las obras requeridas a fin de dar solución pronta y adecuada a los tres citados problemas, dando inicio inmediato a las obras de emergencia y, en breve tiempo, a la preparación de los proyectos de las definitivas que se propusieron. Entre las obras de emergencia pueden citarse:

1. La construcción de plantas de bombeo intercaladas en la red de drenaje.
2. La ampliación de las capacidades de bombeo en el Gran Canal de 62 m³/s a 96 m³/s y la instalación de Plantas Generadoras Diesel de 6,400 kw para emergencia.
3. Los once tanques de tormenta con 143 mil m³ de almacenamiento para remediar las deficiencias de capacidad de escurrimiento de colectores.
4. Los interceptores para desviar el exceso de escurrimiento que se concentraba en los colectores sin capacidad suficiente.
5. La detección de fugas y reparación de tuberías, válvulas y conexiones domiciliarias en las instalaciones del Sistema de Agua Potable.
6. La rehabilitación de pozos y de plantas de bombas del Sistema de agua potable, tanto en Xochimilco como en Lerma, donde también se perforaron nuevos pozos.

De las obras definitivas se pueden citar las siguientes:

1. La rectificación de colectores como el Central entre Palma y Leona Vicario relocalizándolo para evitar la elevación de Guatemala y Argentina, el Colector No. 5, entre Ferrocarril Industrial y Gran Canal, y entre Peralvillo y Vulcanización.
2. La entubación de barrancas y ríos como Río Mixcoac, La Piedad, Consulado, Tequilazco, Churubusco, San Ángel, Barranca del Muerto y la Magdalena.
3. La construcción de nuevos colectores y atarjeas para dar servicio a zonas que estaban carentes, como el colector 15.
4. La construcción de presas para regularización de avenidas y control de azolve.
5. Las nuevas captaciones para aumentar el abastecimiento de agua potable y evitar pozos en la subcuenca de la Ciudad de México.

El Gran Canal del Desagüe fue reparado continuamente: se desazolvó el cauce para conservar área y capacidad de conducción; más tarde se sobreelevaron los bordos y se levantaron los muros de concreto para poder alojar los altos niveles de agua obligados y permitir crear la pendiente hidráulica necesaria, a fin de conducir los caudales máximos esperados.

Para evitar estas condiciones, el Plan consideró entre muchas alternativas analizadas, construir además del Interceptor del Poniente, dos interceptores más, el Central y el Oriente, para conducir hasta el norte las aguas de todos los colectores que interceptan, haciendo que en éstos quedara seccionada la longitud de escurrimiento y, en consecuencia, aumentara la pendiente hidráulica y la capacidad.

Los interceptores, en principio, se proyectaron para hacerlos concurrir en el norte cerca de Cuauhtepac, descargarlos a un cárcamo y de ahí bombear el agua a través de un túnel a un punto del Gran Canal, en Ecatepec, localizado después del km 20, para en esta forma salvar la parte más delicado, deformada e insegura.

En marzo de 1959, siendo Presidente de la República el Lic. Adolfo López Mateos, contándose con un mayor acervo de datos topográficos, geológicos e hidrológicos; con una amplia experiencia técnica en perforación de túneles en arcilla y en roca; y aprovechando el potencial geográfico que brinda la altitud de la ciudad, fue posible proponer al Jefe del Departamento del D.F. la nueva alternativa, esto es, por gravedad, que evitaba la planta de bombas y resolvía la limitación de la capacidad de los túneles de Tequexquiac, con el Emisor Central.

Se solicitaron en 1966 las condiciones de financiamiento al Banco Mundial quien comisionó a una misión, a cargo del Ing. Charles Morse, para los aspectos económicos y financieros, y del Ing. Thomas Thompson, para todos los aspectos de ingeniería civil. Los dictámenes rendidos por la misión fueron elogiosos y aprobatorios para realizar la obra con crédito del Banco Mundial. Pero por los inconvenientes que presentaba esta operación financiera, especialmente para la industria nacional de la construcción, las autoridades resolvieron llevar a cabo la obra con fondos propios del Departamento.

La ciudad es sin duda un ser viviente y el sistema de drenaje es uno de sus órganos vitales. La precaria condición de éste había mantenido para la ciudad un diagnóstico de enfermedad crónica y para evitarle un colapso era obligado que recuperara la salud erradicando el mal; fue por esto que en el mes de enero de 1967, el Presidente de la República, Lic. Gustavo Díaz Ordaz, ordenó al Jefe del Departamento, Lic. Alfonso Corona del Rosal, que iniciara los trabajos del drenaje profundo a la brevedad posible, lo cual se cumplió al darse los primeros golpes de zapapico en las Lumbreras 3 y 5 del Emisor, el 17 de marzo de 1967.

Esta obra, puede considerarse un triunfo y orgullo de la ingeniería nacional por sus dimensiones, los métodos constructivos aplicados y las dificultades superadas durante la ejecución; y así está reconocida, no sólo en el país, sino por técnicos de

todo el mundo, muchos de los cuales estuvieron de visita en diferentes estados de avance de la obra.

El Sistema de Drenaje Profundo tiene 68 kilómetros de túnel construido y su capacidad es de 200 m³/s. El proyecto considera 32 kilómetros más de Interceptores que son necesarios para operar los colectores de toda la parte Sur, aprovechando las conveniencias de operación que esta segunda parte de la obra representa. Para ello la Comisión Técnica de Supervisión recomendó en su Acuerdo N° 310 tomado en la sesión de fecha de 3 de octubre de 1974, que la obra se continúe, y en el N° 334 de fecha 29 de enero de 1975 prolongar el Interceptor Central desde la lumbrera 9 para seguir hasta la lumbrera 7, aprovechando las ventajas de tener construidas las lumbreras y de disponer del “escudo” y la cámara de compresión necesarias para la clase de subsuelo que atravesará el túnel en su prolongación.

Debido al poco mantenimiento que se le dio al Sistema del Drenaje Profundo y a la sobreexplotación que han sufrido los mantos acuíferos de la Ciudad de México, el Drenaje Profundo ha sufrido daños en su estructura y capacidad, debido a que, los materiales no fueron los óptimos para dichos trabajos, como es el caso del concreto, el cual no resistió el ataque químico.

En lo que se refiere a su capacidad, los hundimientos que ha sufrido el Drenaje profundo ha provocado que las pendientes cambien y ya no pueda desalojar las aguas negras por gravedad, como fue diseñado originalmente, para resolver esta problemática, se optó por la construcción de Casas de Bombeo, las cuales resolverían el problema del desalojo de agua.

En este trabajo, abordaremos el tema relacionado con la Rehabilitación del Drenaje Profundo, en el tramo comprendido, entre las lumbreras 8A y 8B del Interceptor Oriente de la Ciudad de México, el cual empleo nuevas tecnologías, tanto en concreto, como en polímeros para la protección del concreto, contra el ataque de gases que se desprenden de las aguas negras.

CAPITULO 1
DRENAJE PROFUNDO Y OBRAS COMPLEMENTARIAS

DRENAJE PROFUNDO

La cuenca del Valle de México es una gran olla cuyas paredes y fondo impermeable están constituidas por rocas volcánicas. Esa olla está rellena de sedimentos fluviales, lacustres y volcánicos que van desde arenas gruesas hasta arcillas con altos contenidos de agua. Dentro de ese marco histórico, geológico e hidrológico funciona el sistema de drenaje del Distrito Federal.

El sistema es combinado, aunque en la actualidad se están separando los drenajes, conduciendo tanto aguas de lluvia como residuales a través de una red primaria y una secundaria, con plantas de bombeo, tanques de tormenta, causes abiertos, ríos entubados, presas, lagunas y drenaje profundo.

Sin el conjunto de obras del sistema de drenaje, no sería posible dar solución al desalojo de las aguas de la Ciudad.

A partir de 1975, año en que se concluyó la primera etapa del drenaje profundo, éste se convirtió en uno de los componentes más importantes del sistema de desagüe. Consta de varios interceptores que fluyen hacia un mismo conducto para evacuar las aguas.

Por sus características de construcción y por la profundidad a que se encuentra, no es afectado por el hundimiento y opera por gravedad, por lo que será una obra durable y económica a largo plazo.

El Sistema de Drenaje Profundo actualmente con 166 km en operación, construido para desfogar los caudales pluviales fuera del Valle de México, es la tercera salida de agua. En 1975 se terminó su primera etapa con la construcción del túnel del Emisor Central, de 6.50 m de diámetro y 50 km de longitud y con lumbreras con profundidades que van de 25 hasta 220 m y a partir de entonces fue aumentando su longitud con la construcción hacia aguas arriba de los seis interceptores que forman parte de este Sistema, con diámetros que van de 3 m a 5 m y profundidades de 20 m a 48 m, que drenan diversas zonas de la Ciudad de sur a norte para descargar en la Lumbrera 0 del Emisor, en el límite de la Delegación Gustavo A. Madero, Distrito Federal, con el Municipio de Tlalnepantla, Estado de México y a través del portal de salida para verter sus caudales en el Río de El Salto, fuera del Valle de México en la parte alta de la Cuenca del Río Pánuco. En 1997, el Drenaje Profundo había alcanzado una longitud de 153 km de túneles en operación; de 1998 al año 2000 se amplió este Sistema, al poner en servicio 12 km y en el 2004 se construyó y puso en operación un kilómetro del interceptor Canal Nacional – Canal de Chalco, en el sur de la Ciudad.

EMISOR CENTRAL

El túnel del Emisor Central, cuenta con una longitud de 49,721.320 m y un diámetro de 6.5 metros, también cuenta con 23 Lumberas, cuyos diámetros oscilan entre los 6 y 12 metros. Este Emisor cuenta con lumberas de gran profundidad, ya que la lumbera más pequeña tiene una profundidad de 49.31 m y la más profunda es de 216 m. Cruza por las delegaciones de Gustavo A. Madero en el Distrito Federal, Tlalnepantla, Cuautitlán, Tepozotlán, Huehuetoca y Melchor Ocampo en el Estado de México, además de Tepeji del Río en el Estado de Hidalgo.



Foto 1: Cimbra Revestimiento Definitivo Emisor Central

La función más importante del Emisor es conducir fuera de la cuenca del Valle de México las aguas del Sistema del Drenaje Profundo de la Ciudad de México.

En 1967 comenzó la construcción del Drenaje Profundo integrado actualmente por un Emisor Central y nueve Interceptores, con una longitud total de 153.3 kilómetros.

Fue en 1975 cuando concluyó la obra del Emisor Central, componente principal del actual drenaje profundo.

EMISOR PONIENTE

En 1962, se inauguró en Túnel Emisor Poniente, con el cual se evitaría la sobrecarga del Gran Canal de Desagüe. El interceptor poniente conducía un caudal de 25 m³/seg a través de túneles de 15 kilómetros de longitud y de un canal revestido a cielo abierto.



Foto 2: Construcción Emisor Poniente

Entre 1963 y 1964 el interceptor se amplió a 32.4 kilómetros y amplió su capacidad a 80 m³/seg llevando las aguas pluviales hacia el Río Cuautitlán, la Laguna de Zumpango y el Tajo de Nochistongo.

El trazo del Emisor, corre de Naucalpan a Tepetzotlán en el Estado de México; recibe las descargas de los ríos Tlalnepantla, San Javier, Cuautitlán y Hondo de Tepetzotlán, los cuales son regulados previamente por las presas Madín, San Juan, las Ruinas, Guadalupe y La Concepción, en el Estado de México. Con la operación del túnel se evitó que las aguas del poniente de la ciudad descargaran en la ciudad sin ningún control.

INTERCEPTOR ORIENTE

Cuenta con 27,850.005 m de longitud y 5 m de diámetro. Está compuesto por 18 lumbreras con diámetros de 6 y 12 m, cuyas profundidades están entre 17 y 49.3 m. Su tramo norte, principia en las calles de Aglabampo y Troncoso; por esta calle se va hacia el norte hasta la calzada Zaragoza. A partir de aquí, el túnel se deflexiona para continuar en forma paralela al Gran Canal hasta la calzada San Juan de Aragón; donde el túnel se dirige hasta el oriente para alcanzar la Av. Eduardo Molina y así llegar hasta la lumbrera 8C ubicada en la colonia Salvador Díaz Mirón, y termina en la lumbrera 0 del Emisor Central, en Cuauhtémoc.

La función principal de este tramo del túnel es aliviar al Gran Canal de Desagüe a través de la obra de toma del cual depende su drenaje gran parte del centro y norte del Distrito Federal, aunque también cuenta con una captación.

Hacia el sur, el Interceptor Oriente corre por el Eje 3 Oriente, a partir de la calle Aglabampo, en su intersección con el Interceptor Centro-Oriente en la lumbrera 4, hasta la avenida Taxqueña, donde se conecta al Interceptor Canal Nacional "Canal de Chalco". En el cruce con la calle Tlazintla se ubica la lumbrera 3, cercana a ella es captado por el colector Plutarco Elías Calles directamente al túnel; en la lumbrera 2, ubicada en la esquina con avenida Apatlaco. Las aguas del cauce entubado del río Churubusco, son captadas en la lumbrera 1.

INTERCEPTOR PONIENTE

El interceptor inicia en la zona suroeste de la Ciudad, en la cuenca del Río Magdalena Contreras, atraviesa las delegaciones Álvaro Obregón y Miguel Hidalgo y al municipio de Naucalpan en el Estado de México, llegando a descargar en el Río Hondo en el mismo estado. Cuenta con una longitud de 16.5 Km. y un diámetro de 4 m.

En su trayectoria recibe las descargas de 16 colectores en el DF y 3 en el Estado de México. En la lumbrera 14, se cuenta con una estructura de descarga al Interceptor Centro Poniente del Sistema de Drenaje Profundo del Bosque de Chapultepec.

Su función principal es la de captar las aguas provenientes del Poniente de la Ciudad para evitar las posibles inundaciones.

INTERCEPTOR CENTRAL

Este conducto cuenta con 16941.56 m de longitud, cruza por las delegaciones de Benito Juárez, Cuauhtémoc, Gustavo A. Madero, Distrito Federal y Tlalnepantla en el Estado de México. Tiene un diámetro de 5 m y trece Lumbreras, que van desde los 25.38 m de profundidad hasta los 45.30 m, el diámetro de las lumbreras está entre 12 y 9 metros. Se encuentra construido desde la lumbrera 4A, en el cruce de

las avenidas Dr. Vértiz y Obrero Mundial, hasta la lumbrera 0 del Emisor Central. Alivia al Río de la Piedad y capta los colectores de Tabasco, 5 de Mayo, Héroes, Río Consulado, Cuitláhuac, Fortuna y Moyobamba. También tiene obras de toma, de los ríos de Los Remedios, Tlalnepantla, San Javier y Cuauhtepac. Beneficia a las delegaciones Gustavo A. Madero, Azcapotzalco, Cuauhtémoc y parte del Benito Juárez.

INTERCEPTOR CENTRO CENTRO

Atraviesa la delegación Venustiano Carranza, cuenta con una longitud de 3,741.67 m de longitud y un diámetro de túnel de 5.00 m

El Interceptor Centro Centro tiene 4 lumbreras, de las cuales, la mínima profundidad es de 22.58 m y la mayor es de 25.66.

INTERCEPTOR SEMIPROFUNDO CANAL NACIONAL- CANAL DE CHALCO

La longitud de este Interceptor es de 10,107.729 m, con un diámetro en el túnel de 3.10 m y una capacidad de conducción de 60 m³/seg. Este interceptor tiene un total de 10 lumbreras, cuya profundidad mínima es de 13.23 m y profundidad máxima de 17.49.

El Interceptor cruza la delegación de Iztapalapa.

INTERCEPTOR OBRERO MUNDIAL

Tiene una longitud de 705.596 metros, diámetro de 3.20 metros y tres lumbreras. Cruza a la delegación Benito Juárez en el Distrito Federal. Su trazo es paralelo al Río de la Piedad, capta a éste último en la lumbrera 2 por medio del Colector Xochicalco, y los escurrimientos de la zona poniente de la delegación Benito Juárez a través del Colector Pestalozzi, en la lumbrera 1 para descargarlos posteriormente en la lumbrera 4 del Interceptor Central.

INTERCEPTOR IZTAPALAPA

Tiene una longitud de 5,331.83 metros y un diámetro de 3.10 metros. Cuenta con seis lumbreras de 9.00 m de diámetro y profundidades de 10.78-13.01. Capta gran parte de las aguas generales de la Delegación Iztapalapa, las conduce hasta la Planta de bombeo Central de Abasto II de 20 m³/seg de capacidad, que a su vez las incorpora hacia el Río Churubusco. También recibe de los desfuegos de las lagunas Mayor y Menor de Iztapalapa, que beneficia la parte noreste de esta delegación.

INTERCEPTOR ORIENTE-SUR

El trazo de este túnel se inicia en la lumbrera 1, ubicada entre las calles Iztaccíhuatl y Anillo Periférico, en Iztapalapa, para concluir en la lumbrera 5 del Interceptor Oriente, en Francisco del Paso y Troncoso, esquina calzada Ignacio Zaragoza. Su longitud de 13.8 Km. con 5m de diámetro y 8 lumbreras con un diámetro de 12 m y una profundidad de 21 m en su trayecto.

Como una opción operativa de gran importancia, este Interceptor utiliza la planta de bombeo Zaragoza de 20 m³/seg con la cual se podrá aliviar al interceptor Oriente-Sur hacia el entusiasmo del río Churubusco, o invertir su funcionamiento en caso necesario.

A través de sus captaciones aliviará a los colectores Luis Manuel Rojas, Canal de San Juan, Zaragoza Norte, Río Churubusco y el Iztaccíhuatl; y a los interceptores Iztapalapa y Oriente-Oriente. Además de la delegación Iztapalapa, se beneficiará a Iztacalco y Venustiano Carranza.

El tramo comprendido entre la lumbrera 7A hasta su confluencia con la lumbrera 5 del Interceptor Oriente.

INTERCEPTOR ORIENTE-ORIENTE

Cruza por la delegación de Iztapalapa en el Distrito Federal y por el municipio de Netzahualcóyotl. Tiene una longitud de 5286.917 m, diámetro de 3.10. Cuenta con cuatro lumbreras, de 9 y 12 m, una profundidad de mínima de 16.532 y una profundidad máxima de 26.040m.

Por medio de lumbreras de captación aliviará a los colectores que drenan la zona nororiente de la delegación Iztapalapa, la laguna de regulación "El Salado", que a su vez recibe la aportación de los colectores Kennedy, Zaragoza Norte y San Miguel Teotongo y los colectores Las Torres, Santa Martha, Ejército de Oriente, entre otros.

INTERCEPTOR CENTRO PONIENTE

Cuenta con una longitud de 16,150 m de longitud, un diámetro de túnel de 4.00 m y trece lumbreras componen a este Emisor, con profundidades de 22.19 a 77 m. Se inicia en la lumbrera 14 del Interceptor del Poniente, cerca del Museo de la Comisión Federal de Electricidad, en la segunda sección del Bosque de Chapultepec, y termina en la lumbrera 1 del Emisor Central, en el Cerro del Tenayo. Posee estructuras de captación en cinco lumbreras, que captan a los colectores Rubén Darío, Río San Joaquín, Refinería Trujillo, Salomón Lerdo de Tejada y al Colector 15; benefician a gran parte de las delegaciones de Miguel Hidalgo y Azcapotzalco. Además alivia al interceptor del Poniente en la lumbrera 14.

TAJO DE NOCHISTONGO



Foto3: Tajo de Nochistongo Actualidad

La gran inundación que se registró en el año de 1555, motivó a que se tomara la decisión de implementar un sistema de drenaje para el lago de Texcoco.

El virrey Luis de Velasco convocó a la construcción de un nuevo sistema de desagüe que evitaría inundaciones en la cuenca.

En 1607 se inició la primera salida artificial del Valle de México: el tajo de Nochistongo.

El propósito de dicha obra era evitar que las aguas del río Cuautitlán afectaran el lago de Texcoco.

El proyecto realizado por Enrico Martínez consistió en la construcción de un túnel y una abertura entre los cerros de Nochistongo. Sin embargo, la falta de revestimiento en la galería del túnel ocasionó varios derrumbes que lo dejaron inservible por muchos años. En 1789, 181 años después del inicio de las obras, se inauguró el tajo a cielo abierto.

INTERCEPTOR CENTRO-ORIENTE

Este interceptor une los Interceptores Oriente y Central. Se inicia en la lumbrera 1, ubicada en las calles Dr. Durán y Dr. José María Vértiz y termina en la lumbrera 4, en Aglabampo y Francisco del Paso y Troncoso.

Beneficia a algunas colonias de la zona centro del Distrito Federal. Para esto se construyó una estructura de captación para el Colector 10 en la lumbrera 2, la cual conduce las aguas del Interceptor Oriente, que a su vez alivia al río Churubusco y al Interceptor Canal Nacional-Canal de Chalco.

INTERCEPTOR ERMITA

Con una longitud de 6 Km. inicia su trazo a la altura del Eje 5 sur con la calzada Ermita Iztapalapa, sigue su trayectoria hacia el poniente de la ciudad para dar vuelta en la calle Luis Manuel Rojas y descargar finalmente en la lumbrera 2 del Interceptor Oriente-Sur; cuenta con cuatro lumbreras con las que capta a los colectores Paraje San Juan, Justo Sierra I y II, Cañas, Quetzalcóatl, Pozos y Luis Manuel Rojas, dando así alivio a parte de la zona oriente de la delegación Iztapalapa.

INTERCEPTOR GRAN CANAL

Con una longitud de 1.01 Km. y un diámetro de 3.10 m este interceptor se inicia en los terrenos de las Plantas de Bombeo 1 y 1A con la L-1 y termina con la L.2 en la proximidad de la confluencia del eje 1 norte y el Gran Canal de Desagüe. En la L-1 captará parte del canal de las P.B. 1 y 1A, para descargarlos directamente al Interceptor Oriente, y la otra en su caso, podrá irse por el entubamiento del Gran Canal.

GRAN CANAL DE DESAGÜE



Foto 4: Cajón Gran Canal

Ya desde su visita al valle en 1804, Alejandro de Humboldt había advertido la necesidad de crear un canal directamente desde el lago de Texcoco con el propósito de evitar las catastróficas inundaciones que habían asolado la ciudad virreinal. Al año siguiente, la ciudad nuevamente quedó hecha una laguna.

A lo largo del siglo XIX, el escenario político en México no se prestaba para la iniciación de monumentales obras de desagüe como era la recomendada por Humboldt. Sin embargo, los lagos de Texcoco, Xaltocan y Zumpango habían comenzado a reducir sus superficies, al ser desviado el río Cuautitlán de su desembocadura natural en Zumpango y ser desviado hacia el río Tula. Por aquella época, la ciudad se comunicaba con los lagos de Xochimilco y Chalco principalmente a través del canal de La Viga. Este pasaba por varios pueblos dedicados a la agricultura localizados en los viejos islotes de la desaparecida laguna de México. Algunos de ellos eran Iztacalco, Santa Anita Zacatlamanco, San Juanico Nextipac y Mexicaltzingo. En la década de 1840, se introdujeron los primeros barcos de vapor para el transporte en el canal, que se había convertido en uno de los paseos favoritos de los habitantes de la ciudad de México.

En 1856, una nueva inundación en la ciudad puso de manifiesto que las obras virreinales de drenaje habían sido superadas. El ingeniero Francisco de Garay retomó la idea de Humboldt, y propuso la creación de un nuevo canal de desagüe. Las obras iniciaron en 1866 y concluyeron en 1900. El 17 de marzo de ese año, Porfirio Díaz, presidente de México en su penúltima reelección, inauguró las obras del drenaje.

El canal comienza al oriente de la ciudad, en la Garita de San Lázaro, atraviesa los lagos de Texcoco, San Cristóbal, Xaltocan y Zumpango y concluye en la entrada del túnel, en las cercanías del pueblo de Zumpango; su longitud total fue de 47.527 kilómetros.

El túnel cuenta con una longitud de 10.21 kilómetros y 24 lumbreras de dos metros

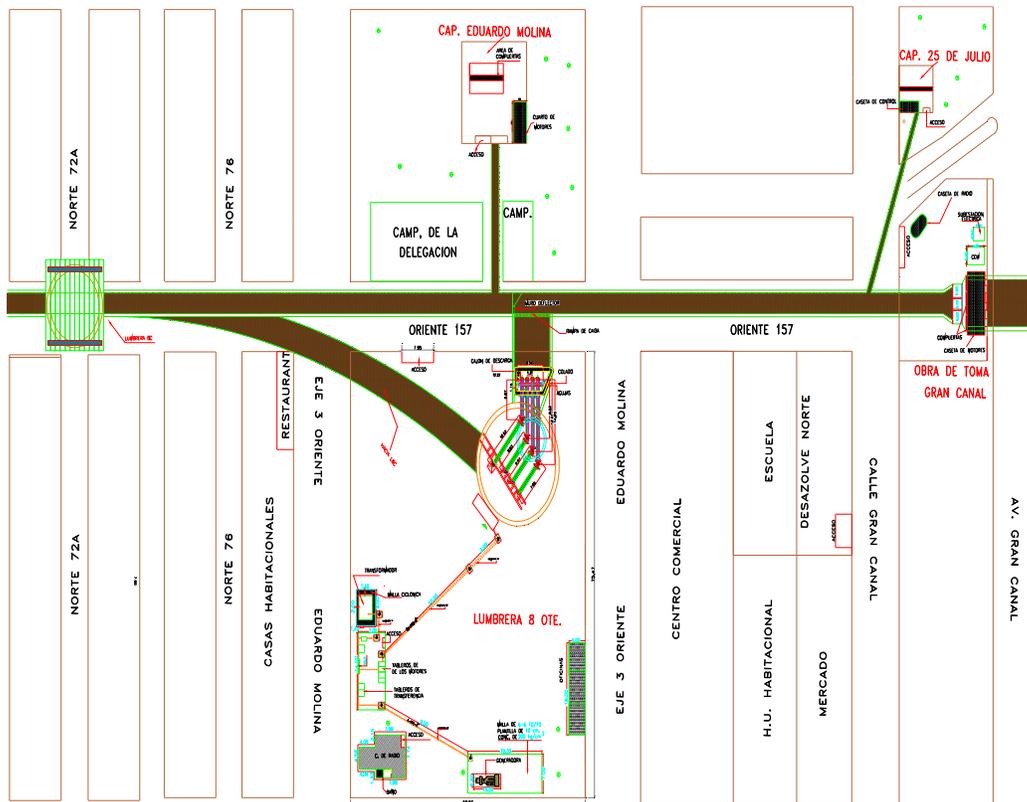
de ancho; su sección transversal es de forma oval, y fue calculado para recibir un gasto de 16 metros cúbicos por segundo.

A la salida del túnel se encuentra el tajo de desemboque de 2, 500 metros de longitud, que se une con el río Tequixquiac. Las obras comenzaron en 1885, cuando se nombró al ingeniero Luis Espinosa como titular de la Junta Directiva del Desagüe. En 1894 quedó concluido el túnel, y a principios de 1900 se inauguró el Canal de Desagüe.

OBRA DE TOMA

La Obra de Toma, es una estructura que se encuentra ubicada entre el Gran Canal de Desagüe y la Lumbreira 8 del Interceptor Oriente del Sistema del Drenaje Profundo.

La Obra de Toma cumple la función de aliviar o liberar el exceso de caudal que maneja en épocas de lluvia el Gran Canal por medio de un cajón que corre por la Av. Oriente 157, cruzando la Av. Eduardo Molina, hasta llegar a la lumbreira 8 y es conducido hasta la lumbreira O del Interceptor Central, para desembocar en el Portal de Salida en el Estado de Hidalgo.



Esquema 1: Conexión Gran Canal Emisor Oriente

LUMBRERA

El Sistema del Drenaje Profundo cuenta con más de 118 lumbreras, con diámetros que oscilan entre 4.00 mts. y los 12 mts, y profundidades que van desde los 10 mts hasta los 250 mts.

La Lumbrera es un pozo, el cual, sirve en un inicio para poder bajar los equipos que serán utilizados para la excavación del Túnel y para extraer el material producto de la excavación.

Cuando el Túnel está en función y empieza a conducir las aguas negras, la lumbrera funciona como pozo de alivio, mitigando la presión que las aguas negras ejercen sobre el Túnel.



Foto 5: Lumbrera 8A

COLECTOR

Se denomina colector o alcantarilla colectora al tramo del alcantarillado público que conecta diversos ramales de una alcantarilla. Se construye bajo tierra, a menudo en medio de las calles importantes, de manera que cada una de las viviendas de esa vía pueda conectarse para la evacuación apropiada de las aguas residuales.

PRESA

En ingeniería se denomina presa o represa a una barrera fabricada con piedra, concreto hidráulico o materiales sueltos, que se construye habitualmente en una cerrada o desfiladero sobre un río o arroyo. Tiene la finalidad de embalsar el agua en el cauce fluvial para su posterior aprovechamiento en abastecimiento o regadío, para elevar su nivel con el objetivo de derivarla a canalizaciones de riego, para laminación de avenidas (evitar inundaciones aguas abajo de la presa) o para la producción de energía mecánica al transformar la energía potencial del almacenamiento en energía cinética y ésta nuevamente en mecánica al accionar la fuerza del agua un elemento móvil. La energía mecánica puede aprovecharse directamente, como en los antiguos molinos, o de forma indirecta para producir energía eléctrica, como se hace en las centrales hidroeléctricas.

CAPITULO 2
“HISTORIA DEL DRENAJE PROFUNDO”

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La lucha universal entre el hombre y el agua ha caracterizado a la ciudad de México de manera especial por las circunstancias geológicas y climáticas que le son propias. Desde la fundación de Tenochtitlán, en 1935, existió el problema de procurar agua para la subsistencia y de realizar obras de protección contra las inundaciones.

Fue el genio de Nezahualcóyotl quien se encargó de resolver los problemas de abastecimiento y de protección contra las inundaciones de su época, para ello construyó el albardón de 16 kilómetros de longitud, con el cual se separaban las aguas saladas y se aislaba la acumulación de volúmenes escurridos para proteger a la isla. Durante la conquista de Hernán Cortés fue destruido el albardón para el paso de sus bergantines, debido a la sequía que se presentó, se olvidó la reparación de la obra. Pero la abundancia de lluvia de la época que siguió, hizo necesaria la construcción del albardón de San Lázaro.

El peligro subsistía y se preocupan por evitarlo construyendo calzadas, diques y rellenos. Enrico Martínez logró sacar de la cuenca a las aguas del Río Cuautitlán con un socavón de 10.5 m² de sección, y 7.0 kilómetros de longitud aproximada.

A lo largo del tiempo, las superficies de los lagos se fueron reduciendo por cambiar el uso de suelo y aumentar el consumo del agua. El desagüe de la ciudad se hacía por las acequias y los canales que llevan las aguas al Lago de Texcoco. Las inundaciones aumentaban los daños provocados conforme crecía la ciudad.

Después de las obras del Socavón y más tarde del tajo de Nochistongo, no se hizo nada radical para defender a la ciudad de México de las inundaciones, hasta que se iniciaron los trabajos del túnel de Tequixquiac y del Gran Canal del desagüe, en 1856. Estas obras sufrieron una serie de interrupciones durante su ejecución hasta concluirse en marzo de 1900.

Además del Tajo de Nochistongo y del túnel (viejo) de Tequixquiac, el valle cuenta con otra salida, nuevo túnel de Tequixquiac, que fue construido entre 1940 y 1952.

Todas las obras de desagüe construidas en aquellas épocas, incluyendo la red de atarjeas y colectores, el Gran Canal y los túneles de Tequixquiac, se proyectaron para trabajar por gravedad y así funcionaron originalmente, pero para servicio de un área limitada, la que siempre fue sobrepasada.

El crecimiento explosivo de la población del Distrito Federal incrementó a la misma escala la demanda del agua potable. Para satisfacerla, se recurrió a la perforación de pozos en la zona urbana, lo que aceleró el hundimiento general del terreno. Una de las consecuencias de esto fue el dislocamiento de la red de atarjeas y colectores, produciéndose columpios y contra pendientes en los conductos que, debían desaguar al Gran Canal por gravedad. Este estado de la red provocó serias inundaciones.

Debido a la extracción de agua del subsuelo y a los hundimientos consiguientes, que han disminuido sin llegar a desaparecer, fue necesario efectuar obras constantes de rectificación, de reconstrucción de atarjeas y colectores, y de mantenimiento de los cárcamos de las plantas de bombeo al Gran Canal. La capacidad con la que se construyó éste fue de 5m³/seg en los primeros 20 km y de 17.5 m³/seg en los restantes para el control del lago.

Otro de los problemas que ha acarreado el hundimiento de la ciudad de México es que, el terreno de la parte plana de la ciudad se encuentra a niveles inferiores a los del Gran Canal (este mismo ha perdido pendiente en los primeros kilómetros, con la consiguiente disminución de su capacidad de desagüe).

En la década de los 70's se tuvo que gastar más de 60 millones¹ de pesos en trabajos de rehabilitación de los túneles de Tequixquiac y el Gran Canal. Para desalojar las aguas negras del y pluviales se había contado con:

1. El Interceptor del Poniente, primera obra definitiva construida para auxilio del Gran Canal, aproximadamente arriba de la elevación 2260 m s.n.m., que corresponden a la zona residencial situada en las lomas del poniente.
2. El Gran Canal del Desagüe, debajo de la elevación 2260 m s.n.m., que drena la zona baja de la ciudad, la cual ocupa terrenos del antiguo lago, de fuerte deformación y hundimientos desiguales y en donde se presentan las más graves dislocaciones del drenaje.
3. El Río Churubusco que funciona como estructura auxiliar, drena la parte sur de la ciudad y conduce los escurrimientos de la cuenca al Lago de Texcoco, donde son regularizados; estas aguas, son, finalmente, descargados al Gran Canal.

De todo lo anterior se infiere que uno de los más graves problemas de la Cuenca del Valle de México es el control, la conducción y el alejamiento de las aguas negras y pluviales sobrantes del área más poblada de la República.

En 1954, la Dirección General de Obras Hidráulicas del Departamento del Distrito Federal formuló el plan general para resolver los problemas de hundimiento, las inundaciones y el abastecimiento de agua potable de la ciudad de México. En el plan se propuso un nuevo sistema de drenaje basado en los siguientes puntos:

1. Utilizar al máximo el alcantarillado existente y aliviar su trabajo, en época de lluvias, por medio de conductos interconectores que limitan las áreas tributarias de cada colector a valores compatibles con sus dimensiones y sus pendientes.

1.- De acuerdo al índice de inflación del Banco Mundial de 2012, que es 3.6, equivaldría hoy en día a \$ 216'000,000.00 de pesos.

2. Instalar una planta de bombeo con capacidad de 80 m³/seg y construir un túnel para el mismo caudal que descargaría las aguas negras y pluviales en el Gran Canal del Desagüe, a la altura de San Cristóbal Ecatepec.
3. Entubar el primer tramo del Gran Canal y la totalidad de la Prolongación Sur, ya que su existencia constituye un serio problema sanitario para la población.
4. Ampliar la red de colectores hacia las regiones del Distrito que no la posean.

En el período 1954-1958, se propone ejecutar los trabajos que se mencionan a continuación:

- Interceptor del Poniente
- Interceptor Central
- Planta de Bombeo Norte (50%)
- Colector y Planta de Bombeo de Aculco
- Canal de la Planta de Bombeo Norte a San Cristóbal Ecatepec
- Ampliación de la red de drenaje
- Entubamiento de la prolongación sur del Gran Canal
- Rehabilitación de la Desviación Combinada

La primera fase del proyecto de 3 interceptores además del Poniente, consistió en reducirlos a sólo dos: el Central y el Oriente. Estos concurrían en la misma planta de bombeo, próxima a la Desviación Combinada, para descargar al Gran Canal a través de un Túnel. Posteriormente, se hizo el proyecto del Emisor Central para sustituir la planta de bombeo, proyecto con el cual se obtuvieron las mayores ventajas económicas, de operación y de seguridad.

Se estima que son equivalentes los volúmenes de agua utilizados, por una parte en la agricultura del Valle de México, y por la otra en la industria y en los servicios. El volumen actual de las aguas expulsadas por las obras de desagüe sería suficiente para poner en explotación bajo riego, en el Valle del Mezquital, una superficie de 60 000 ha de tierras de mejor calidad que las del Valle de México. De esta manera se ayudaría a resolver parte de los graves problemas económicos y sociales que han afectado tradicionalmente a las comunidades que habitan aquella zona.

Por razones políticas, económicas, de urbanización y de seguridad, era urgente iniciar la construcción del sistema propuesto de interceptores y emisores profundos, para proteger a la ciudad contra el peligro de inundaciones y sus consecuencias en forma definitiva.

Desde el punto de vista financiero la inversión para la ejecución de estas obras era inobjetable y cualquier demora en realizarlas representaba una economía mal

aplicada, ya que los gastos para emergencias no son recuperables. Además, debe tenerse presente que cada año aumenta el peligro de inundaciones, cuyas repercusiones económicas pueden ser superiores a la inversión necesaria para ejecutar las obras.

Después de construido el Interceptor del Poniente se obtuvo la ventaja de dos Interceptores denominados Central y Poniente que fueron profundos, para garantizar el funcionamiento permanente a pesar de los hundimientos y que descargan al Emisor Central (conducto de 50 kilómetros en túnel). Así, se podía desaguar al Río del Salto, en vez de hacerlo al Río Salado a donde llegan las aguas del Gran Canal a través de los túneles de Tequixquiac.

ESTUDIOS Y PROYECTO

ESTUDIOS PRELIMINARES

Para planear los estudios previos de los Interceptores Profundos y del Emisor Central en la disciplina topográfica, se emplearon planos fotogramétricos del área metropolitana a escala de 1:2000, con curvas de nivel cada 2 m teniendo como apoyo la triangulación catastral del Distrito Federal, asimismo, para el Emisor Central, que se encuentra fuera del área metropolitana, se emplearon mosaicos fotogramétricos rectificadas a escala 1:25000, en toda su longitud o sea desde la ciudad de México, hasta la Presa Requena en Tepeji del Río, en el Edo. de Hidalgo.

El trazo geométrico del Emisor para el estudio geológico tuvo requerimientos de una triangulación topográfica que abarca una zona de 3 a 4 kilómetros a ambos lados de la línea que une la confluencia de los interceptores y la elevación 2 100 del río el Salto, que es la descarga del emisor.

TRIANGULACIÓN TOPOGRÁFICA

Para el desarrollo de la red, fueron necesarias dos bases; una de desplante de 1800.135 m de longitud, llamada base Cuauhtepc y que se localiza al principio del Emisor Central; y la otra de cierre y comprobación denominada Base el Salto, de 2666.181 m de longitud y que se localiza cerca del Portal de Salida del Emisor.

La medición de las bases se hizo por procedimientos directos empleando un tránsito Wild T2 de un segundo de lectura y dos estadías horizontales INVAR, con un equipo de iluminación.

El ángulo paraláctico como argumento para la distancia se midió en cada estación con 8 reiteraciones, procurando que la diferencia entre media aritmética y las lecturas no fueran superiores a un segundo; lo que nos condujo al logro de una precisión de 1:20 000.

La compensación de cuadriláteros que se formaron sin punto central fue por el procedimiento de mínimos cuadrados; obteniéndose en la ecuación de lados una diferencia logarítmica de 5 en la séptima cifra únicamente en uno de ellos; y en los otros, un valor menor o igual a 4, lo que aseguro en cada figura un error máximo de 5 mm. en las distancias calculadas, tomados de diferentes triángulos; dando una a la triangulación una precisión de 1:37 400.

Las coordenadas de los vértices de la triangulación se calcularon en proyección ortogonal, cuyo eje de las Y o sea la línea Norte-Sur, pasa por el poste geodésico construido en la azotea de la Dirección de Estudios Geográficos de Tacubaya, el eje de las Xs es una normal al eje, lo que significa que se tomó como origen de coordenadas o sean los de valores cero, el Poste Geodésico ya referido.

NIVELACIÓN

Para las condiciones desfavorables de iluminación, se eligieron los niveles Wild N2, Niveles Zeiss y niveles KONI en sus dos tipos; siendo los estatales también Wild y Zeiss con graduación especial y capa reflejante.

Todas las nivelaciones del Departamento del Distrito Federal para el plan Hidráulico, están referidas al Banco de Nivel Atzacolco localizado precisamente en la Col. Atzacolco, de características inalterables y cuya altitud es de 2 245.008 m.

Una vez que quedó definido el trazo geométrico definitivo, atendiendo a los estudios geológicos, sobre el mosaico aéreo se marcaron los puntos que definían los alineamientos generales que fueron: confluencia de los Interceptores Central y Oriente; primer punto de inflexión localizado en el camino a Presa Guadalupe; segundo punto de inflexión localizado en el camino Tepozotlán a la teja, Lumbrera 17 (punto de inflexión 3) y monumento sobre el Río el Salto con elevación de 2 100m.

Durante la construcción de las lumbreras se volvieron a revisar las distancias, referencias, nivelaciones y principalmente se adiestró al personal encargado de las brigadas topográficas, y en el uso del Giróscopo para la determinación del azimut de los túneles de lumbrera a lumbrera.

TRAZO EN LOS TÚNELES

Para proyectar el trazo de la superficie dentro de la lumbrera se utilizó un teodolito taquímetro THO 030 KARL ZEISS GENA. Para revisar o replantear la bajada de la línea en las lumbreras se usó la geometría descriptiva de donde se sabe que la traza de dos planos verticales, es una línea perpendicular a un plano horizontal y en nuestro caso la línea representa objetivamente el hilo de un plomada.

Para engendrar un plano vertical, se hizo uso de un nivel Zeiss Ni2 automático. Haciendo uso de tránsitos con sus respectivos prismas se colocan dentro de la lumbrera, se observa un punto superior, simultáneamente con los dos aparatos, teniendo en cuenta que cualquier punto contenido en las dos visuales está contenido en la vertical; se fija el punto en el piso de la lumbrera por interacción de las dos visuales.

Definidas las líneas de unión de lumbrera a lumbrera y su proyección dentro del túnel se procedió a determinar su azimut por medio del Giroscopio Wild Gaki montado sobre un tránsito T-16 modificado, así como el equipo de accesorios normales y suplementarios.

Entre los métodos para determinación del azimut se optó por el método de los pasos, usando un cronómetro Omega con aguja rastreadora con lecturas de un décimo de segundo.

Las orientaciones se efectuaron cada 500 m para control de la línea, los cadenamientos fueron marcados de ademe que fueron aprovechados para la instrumentación y la determinación de la subrasante.

En los túneles excavados en arcilla la línea se dio con láser de gas Helio-Neón, cuyo alcance es aproximadamente un kilómetro, este instrumento se montó sobre una base de concreto en una línea paralela al trazo, dándole al rayo la misma pendiente geométrica de la subrasante hidráulica.

Se marcó una señal en la parte posterior del escudo donde llegaba al rayo, con la cual se controlaba la línea de avance tanto en la línea como en pendiente.

Los procedimientos topográficos que se usaron dieron uniones de dos frentes de excavación inferiores a 5 cm lo que nos comprobó la bondad de los aparatos y la destreza de los operadores.

ESTUDIOS HIDROLOGICOS E HIDRAULICOS

Con base en el Plan General para resolver los problemas de hundimiento, las inundaciones y el abastecimiento de Agua Potable de la ciudad de México y como complemento al mismo, se definen las siguientes soluciones.

1. El Interceptor Central que desalojara los escurrimientos de la zona central de la ciudad.
2. El Interceptor del Oriente, que junto con el Central conducirán por gravedad los escurrimientos de la zona Oriente de la población.
3. El Emisor Central que recogerá las aguas de los dos interceptores profundos para enviarlos por gravedad hasta la Presa Requena.

Los Interceptores serán construidos en el seno de materiales arcillosos comprensibles de comportamiento viscoelástico y el Emisor se excavara en roca, tobas volcánicas y en depósitos de aluvión.

ESTUDIO HIDROLOGICO

La ciudad de México tiene un sistema de drenaje combinado de aguas negras y pluviales. El gasto de aguas negras se considera directamente proporcional a la dotación de agua potable en la ciudad.

El gasto de aguas negras propio de cada Interceptor, se calculó con base en las áreas tributarias de cada una de ellos y al crecimiento futuro probable de la ciudad, considerando una densidad de población de 200 habitantes/ha y una aportación de 290 lts/día (80% de la dotación). Para calcular el gasto máximo de la función del gasto medio diario, se afectó este de un coeficiente de 2.

En esta forma se obtuvo un gasto de aguas negras para el Emisor Central de 47.00 m³/seg.

La determinación de los gastos de escurrimientos pluviales superficiales captados por los diferentes tramos de los Interceptores, se efectuó con la fórmula racional $Q=ACi$ siguiendo estos pasos:

1. Se dividieron los colectores en zonas tributarias para cada diámetro y se calculó el área de influencia de cada uno, en hectáreas.
2. Se determinó el tiempo de concentración para cada tramo independiente, de acuerdo con el tiempo de entrada que se estimó el promedio de 15 min., el tiempo de escurrimiento del agua en el colector, desde el parteaguas al punto de desfogue al interceptor.
3. Se supuso una lluvia con duración de una hora en todo el área tributaria y con un valor de intensidad +4.1 cm/hora (correspondiente a la frecuencia de 5 años).
4. Se determinó el valor del coeficiente C que resulto variable entre 0.39 y 0.50 según la variación de usos del suelo en cada área.
5. Con estos valores se calculó el valor de Q en cada tramo del colector.

Con el Método Gráfico Alemán se integraron los escurrimientos dentro de los colectores, teniendo así, en cada tramo, un cierto gasto de diseño.

Al empezar la lluvia, se tiene un escurrimiento que irá aumentando hasta convertirse en el gasto total $Q=ACi$, cuando la lluvia dure el mismo tiempo que el de concentración del área, si, como se ha supuesto, la duración de la lluvia es mayor que el tiempo de concentración al gasto máximo $Q=ACi$, así se mantendrá constante durante un tiempo igual a la diferencia entre la duración T de la lluvia y el tiempo de concentración t de la lluvia.

Para determinar el gasto máximo que pasa por el punto de desfogue en estudio, se abaten los diagramas parciales de cada colector, y se miden la mayor ordena comprendida en los diagramas acumulados sin considerar los espacios vacíos.

Con el Método Racional, se obtuvo un gasto pluvial de 107 m³/seg para el Emisor Central, que sumado al gasto de aguas negras de 47.00 m³/seg da un total de 154 m³/seg.

El método del Hidrograma Unitario relaciona el escurrimiento en una sección de la corriente con la precipitación en el área de aportación que lo ha producido. La forma del hidrograma de escurrimientos pluviales depende únicamente de las características físicas de la cuenca. Esta base fundamental puede desglosarse en cuatro suposiciones básicas:

1. La intensidad de lluvia que se considera es la de promedio en todo el área de la cuenca.
2. Tormentas de la misma duración, pero con diferentes intensidades, producen diferentes gastos máximos escurridos, para el tiempo total de escurrimiento es el mismo.
3. Para dos tormentas de la misma duración, la relación que existe en un instante cualquiera entre los gastos escurridos, es la misma que entre los volúmenes totales de escurrimiento pluvial.
4. EL hidrograma de escurrimiento pluvial correspondiente a una tormenta es independiente de los correspondientes a tormentas anteriores.

V_a = Volumen de escurrimiento pluvial debido a la tormenta

a = Área bajo la curva del Hidrograma a .

V_b = Volumen de escurrimiento pluvial debido a la tormenta

b = Área bajo la curva del Hidrograma b .

En virtud de las hipótesis 2 y 3.

$$\frac{ib}{ia} = \frac{Qb}{Qa} = \frac{Vb}{Va}$$

Para obtener el hidrograma unitario de la cuenca para una tormenta de intensidad se siguen los siguientes pasos:

1. Del hidrograma registrados se hace la separación del escurrimiento que a la vista es ajeno a la lluvia considerada.
2. En el hietograma de la tormenta se descuentan las pérdidas por infiltración, detención superficial, evapotranspiración, etc., quedando así el hietograma de lluvia neta.

$$h_a = (i/t - i/p)^v$$

3. Se dividen las ordenadas el hidrograma de escurrimientos pluviales entre la altura neta de precipitación; por las dos hipótesis 2 y 3, el resultado será un hidrograma que corresponda a una tormenta de intensidad unitaria y de duración U.

Si se quiere tener hidrogramas para lluvias de duración múltiple de U, se hará la superposición de causas y efectos que permite la hipótesis 4.

Si para una tormenta compuesta de una sucesión de lluvias de intensidad neta y duración U se requiere tener el hidrograma correspondiente, primero se obtiene el hidrograma unitario para la duración U, y después, con base en las hipótesis 2 y 3, se multiplican las ordenadas del mismo por cada una de las intensidades h^n ; el mismo resultado son los hidrogramas de escurrimientos pluviales que superpuestos cronológicamente dan el hidrograma para la tormenta en cuestión.

En la aplicación del método del hidrograma unitario a la Ciudad de México se tomó en cuenta que desde septiembre de 1960 empezó a funcionar el Interceptor del Poniente, y que, por lo tanto, se redujo el área drenada por el Interceptor Central.

Por otro lado, se consideraron los crecimientos futuros de la ciudad y el incremento de escurrimientos.

El hidrograma más desfavorable resulto el correspondiente a dos tormentas de 1 y 4 hrs de duración y separadas de 9 hrs.

El gasto máximo es de 153.00 m³/seg, el que, al sumarle un gasto base de aguas negras estimado en 47.00 m³/seg, resulta de 200.00m³/seg. La estimación anterior es para las condiciones que prevalecieron en el año 2000.

ESTUDIO HIDRAULICO

Los resultados obtenidos aplicando los diferentes métodos de calculó, fueron los siguientes:

1. Análisis de la Fórmula Racional y Método Gráfico Alemán
 Gasto del Pico = 154.00 m³/seg.
 Duración del Hidrograma: Coincidió con el obtenido por el Método del Hidrograma Unitario.

2. Análisis con el Método del Hidrograma Unitario.
Gasto del Pico = 200 m³/seg.
Duración del Hidrograma: 45 hrs.
3. Análisis con Métodos Estadísticos (Para una Frecuencia de 1,000 años).
Gasto del Pico = 200 m³/seg.
Duración del Hidrograma = 32 hrs.

Se decidió que en forma conservadora, el hidrograma de diseño fuera el de 200.00 m³/seg de gasto en el pico y de 45 hrs de duración.

I INTERCEPTORES

Considerando los hidrogramas y los gastos máximos pico en distintos puntos tanto del Interceptor Central, del Oriente, estos estarán formados por dos tramos de diferente diámetro.

Interceptor Central. Estará formado por un tramo de sección circular de 4.00 m de diámetro y de 11.85 km de longitud, con una pendiente geométrica igual a 0.0005, y por otro tramo de 5.00 m de diámetro, 13.00 km de longitud de igual pendiente.

Se utilizaron los resultados del estudio hidrológico efectuado con la fórmula Racional y el Método Gráfico Alemán, y se aplicó la fórmula $Q = 0.27851 C_d^{2.63} S^{0.54}$ de Hazen- Williams con un coeficiente $C = 160$ (para grandes tuberías de concreto liso) para calcular el gasto máximo, y la fórmula de Manning con $n = 0.010$ para los gastos máximos y mínimos. También se consideraron las fórmulas de Kozeny, Colebrook y otras.

Interceptor Oriente. Estará formado por un tramo de 4.00 m de diámetro y 10.73 km de longitud; la planilla del conducto tendrá en este tramo una pendiente de 0.0007; por otro lado de 5.00 m de diámetro, 16.06 km de longitud, con 0.0005 de pendiente de plantilla.

II EMISOR CENTRAL

La cota inicial y final de la plantilla del túnel fueron fijadas en función de la cota final de los Interceptores Central y Oriente, las condiciones de la descarga en el Río Tula, aguas debajo de la Presa Requena.

El desnivel así obtenido es de 92.01 m y la longitud del túnel de 47271.62 m; con esto, la pendiente resultante es de 0.000195.

Pensando en el efecto regulador del túnel durante el paso de la avenida, se calculó el paso de esta a lo largo del túnel. Para ello se preparó un programa para la calculadora IBM 709 que resuelve las ecuaciones para flujo variado por incrementos finitos mediante el método de las características.

Se realizó el cálculo para varios diámetros y se obtuvo el diámetro mínimo necesario para dejar pasar la avenida de diseño, sin llegar al ahogamiento.

La regulación es mínima y que el túnel ha de ser diseñado para desalojar un gasto constante igual a 200.00 m³/seg.

La capacidad máxima del túnel de 6.50 m de diámetro sin que llegue a funcionar bajo presión utilizando las diversas fórmulas de pérdida de carga por fricción antes referidas.

Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Formula de Hazen Williams	Q= 232.00 m ³ /seg.
Formula de Manning	Q= 223.00 m ³ /seg.
Formula de Kozeny	Q= 206.00 m ³ /seg.
Formula de Chezy-Colebrook	Q= 215.00 m ³ /seg.
Formula de Weisbach-Moody	Q= 200.00 m ³ /seg.

GEOLOGIA

PLANEACIÓN Y PREPARACIÓN

Preámbulo

Desde que el hombre colonizó la cuenca de México hará 30 mil años, ha presenciado erupciones volcánicas e inundaciones, por ser éstas las catástrofes naturales del lugar.

Cuando el hombre comenzó a construir ciudades en las partes centrales de la cuenca, hará mil años, tuvo que enfrentarse a problemas de cimentar pirámides, templos palacios, los cuales se hundían en las arcillas lacustres cuando no eran apoyados sobre pilotes.

En tiempos modernos, con la creación de una urbe gigantesca, han sumado a estos peligros naturales dos nuevos riesgos: hundimientos de grandes superficies urbanas a consecuencia de la extracción de agua potable del subsuelo y dificultad en la evacuación de los crecientes volúmenes de aguas negras al exterior de la cuenca. Además de desarrollar el arte de cimentar y construir edificios, se construyeron grandes obras de defensa contra las inundaciones, como el albaradón de Nezahualcóyotl; posteriormente las obras de desagüe de Nochistongo y Tequixquiac y en la actualidad el Sistema de Drenaje Profundo. Esta última obra resuelve en definitiva el problema de las inundaciones.

PRELIMINAR

Una vez concebida por parte de un ingeniero la idea fundamental y las magnas directivas de la obra, es necesario movilizar para el buen éxito de los trabajos la totalidad de los conocimientos tectónicos, estratigráficos, hidrológicos, sismológicos y geotécnicos al alcance de la geología.

Durante 10 años, se desarrollaron los trabajos; tres años se dedicaron a la planeación y exploración y siete a la construcción. Distinto a la mayoría de los casos de grandes obras, ésta se emprendió con urgencia. Se atacó cuando la ciudad de México ya había crecido hasta tal grado, que las aguas negras amenazaban con desbordarse del Gran Canal en los meses de lluvia.

El hundimiento ya había provocado que la ciudad en su parte central se hallara 5 m debajo del vaso de Texcoco, antigua depresión máxima receptora de inundaciones de la cuenca.

PRIMERA VARIANTE

Los primeros esquemas consistían en dos interceptores profundos, que se unían en el norte de la ciudad de México por Ticomán; de aquí arrancarían un túnel de mayor diámetro, en línea recta a través de la Sierra de Guadalupe continuando por la planicie de Cuautitlán-Huehuetoca.

Este proyecto fascinante y simple por su rectilineidad, tropezó con cierta oposición sentada de los geólogos; ellos consideraban arriesgado cruzar los depósitos de aluviales no consolidados de la planicie de Cuautitlán, aun con la ayuda de escudos.

SEGUNDA VARIANTE

Esta variante consistía en construir un túnel primero en las rocas volcánicas del lado meridional de la sierra de Guadalupe, desde Ticomán en el sureste hasta la Presa de Angulo en el noroeste, para alcanzar aquí los abanicos volcánicos de la formación Tarango.

El avance en dichos abanicos rumbo al norte hasta Tepetzotlán no parecía problemático, previéndose algunas dificultades en los aluviones del río Cuautitlán y otras en aquellas del río Tepetzotlán. Progresó en seguida en las series volcánicas de la sierra de Tepetzotlán sobre su flanco oriental hasta Huehuetoca parecía igualmente sensato y factible.

Finalmente, desde Huehuetoca rumbo al norte y después quebrando al noreste, el túnel se excavaría en las tobas endurecidas de Nochistongo, al igual que se había hecho en el siglo XVII bajo la dirección de Enrico Martínez. El portal de Salida del túnel se situaría debajo de los basaltos de El Salto, desembocando así la gran obra al Río El Salto cerca de la presa Requena.

INTERCEPTORES

El proyecto incluyó tres túneles interceptores, corriendo de sur a norte debajo de la ciudad. Uno, el Interceptor del Poniente, ya se había construido previamente al pie de las Lomas para coleccionar principalmente las aguas pluviales que desciende en las barrancas. Los otros dos interceptores consistían en túneles que cortaban la planicie de la ciudad, uno en el centro y el otro límite oriente. Ambos avanzaban a la Sierra de Guadalupe, el primero directamente a Ticomán y el segundo pasando primero al sitio donde el Canal de los Remedios cruza el Gran Canal del Desagüe y después de aquí al oeste en la planicie aluvial hasta Ticomán también.

La excavación del Interceptor del Poniente se había llevado a cabo sin dificultades arriba del nivel freático. La obra reveló la estructura y litología de la formación Tarango.

Avanzar en esta formación requirió de muy escaso adorno; sobre grandes distancias había sido posible excavar los frentes con pala, apenas recurriendo al uso de dinamita; la sobreexcavación no fue un problema.

La construcción de los Interceptores Central y Oriente se concibió excavándolos a profundidades de 40 m con el fin de situarlos debajo de lo que se conocía en la Cuenca como la capa dura el estrato bajo de arcillas lacustres. Esto se hacía deliberadamente, pues el estrato inferior ya había pasado por la fase de

consolidación y asentamientos, inducidos por la extracción de agua desde los acuíferos subyacentes. Así se concluía que los túneles ya no sufrirían consecuencias graves de futuros hundimientos de la ciudad.

EXPLORACIÓN

a) El Túnel Emisor

Se decidió explorar la factibilidad de este esquema de túnel con sondeos, ejecutándose un total de 32 barrenos completos con recuperación integral de núcleos y pruebas de permeabilidad. El resultado puede expresarse de la siguiente manera.

1. Tramo Sierra de Guadalupe: recuperaciones buenas en lavas, brechas y algunas tobas; por lo general bajas permeabilidades; uniformidad de litologías; fracturamientos importantes únicamente en la zona de Barrientos.
2. Tramo de los abanicos volcánicos: recuperaciones buenas; permeabilidades bajas a medianas; uniformidad de litologías: lahares, suelos y algunos horizontes de pómez; pocos fracturamientos.
3. Tramo Sierra de Tepetzotlán: recuperaciones de medianas a bajas; a menudo permeabilidades elevadas; gran variedad en litologías: rocas lávicas, ignimbritas, tobas, conglomerados y limos arcillosos; abundancia de fracturamientos.
4. Tramo Huehuetoca- El Salto: recuperaciones medianas a buenas; irregularidad en litologías: conglomerados y arenas cementadas; en el sur arcillas endurecidas y basaltos en el norte; gran variedad de permeabilidades.

Con base en esta campaña de exploraciones, cuyos datos se vaciaron en un corte geológico general, pudo concluirse que el túnel era económicamente factible y que su mitad sur, comprendidos los tramos de la Sierra de Guadalupe y las lomas al oeste de Cuatitlán no presentarían problemas especiales; sin embargo la mitad norte, comprendiendo las bases de la Sierra de Tepetzotlán y después los lomeríos entre Huehuetoca y El Salto, por su heterogeneidad y la irregularidad en permeabilidades presentaría mayores dificultades, más tampoco problemas insuperables.

Las condiciones para un túnel de gran diámetro en dichas arcillas aparecían adversas, y no bondadosas como lo habían sido al nivel superior del túnel antiguo de Enrico Martínez.

En relación a lo anterior había también los que se oponían a la posición bastante clara del Director de Obras Hidráulicas, de que si Enrico Martínez pudo atravesar las arcillas de Nochistongo a principios de la Colonia, tanto más fácil resultaría para los ingenieros del siglo XX hacerlo.

En cierto momento intervinieron también sismólogos y especialistas en ingeniería sísmica. Los primeros analizaron la posibilidad de un sismo de mayores proporciones que pudiera cortar, desplazar e inclusive interrumpir el túnel en el área de Tepetzotlán. Los últimos se preocupaban por el diseño antisísmico del túnel.

Un estudio sismológico concluyó en definitiva que no podía ocurrir ante la realidad tectónica de la región un sismo con tales consecuencias como había ocurrido en Acambay y por lo tanto el trazo propuesto por Obras hidráulicas quedó en vigor.

b) Los Interceptores

Las exploraciones, llevadas a cabo en la planicie aluvio-lacustre de la ciudad, comprendieron extensos sondeos con recuperaciones de muestras inalteradas; revelaron éstas que en cercanías de la Sierra de Guadalupe, a la salida del Valle de Cuauhtepic, predominaban depósitos limo-arenosos de origen fluvial, mientras que las arcillas lacustres abundaban más al sur. Concluyeron que la extensión del Interceptor Central hasta la lumbrera 9, no existían condiciones estratigráficas en el sentido clásico conocido de Arcilla Superior-Capa dura- Arcilla Inferior. Por consiguiente el túnel se colocaría al sur, en el sitio de la lumbrera 9, en el contacto de los sedimentos aluviales de la Capa Dura con la formación de Arcillas Superiores; pero en su avance al norte cortaría elementos estratigráficos subsecuentemente inferiores: primero dos transgresiones lacustres, igualmente con arcillas, y finalmente depósitos limo-arenosos aluviales, los cuales cerca del valle de Cuauhtepic adquieren más resistencia que al sur, donde suelen ser deleznales.

EL TRAZO DEFINITIVO

Como resultado de las exploraciones así como de las deliberaciones geológicas y geotécnicas se aceptó el trazo de la mitad sur del Túnel Emisor en su forma original; sin embargo, se decidió mover el trazo de la obra en su mitad norte al poniente, avanzando así el túnel al área de Requena por el lado oeste del Co. Sincoque.

Lumbrera 9. Contra su localización al sur de Tepetzotlán no había ninguna objeción geológica. Se requirieron inyecciones y tratamientos costosos para continuar la excavación, además de bombeos extensos. Después de intentar la terminación de esta lumbrera, lo cual duró unos 3 años, se cambió con criterio prudente su localización a la lumbrera 9-A, para que el túnel no quedara debajo del templo de Tepetzotlán, el cual debido a las mismas tobas subyacentes tienen condiciones de comprensibilidad altas, las cuales alarmaban la opinión de algunos científicos.

Lumbrera 14. Un caso de una lumbrera excavada sin exploración local previa. Después de 3 años de batallar se terminó, habiéndose bombeado enormes volúmenes de agua que entraban por una toba pumítica sumamente permeable.

Por lo que respecta a las demás lumbreras, (un total de 13 de 21) éstas se terminaron en un lapso de 3 a 12 meses sin más dificultades que las normales del caso. Las distintas compañías contratistas en esta etapa tuvieron oportunidad de familiarizarse con alguno de los grandes problemas a los que se enfrentarían más adelante.

EJECUCIÓN

PRIMEROS AVANCES

Las primeras lumbreras se terminaron a mediados de 1967, y en seguida se atacaron los frentes del túnel. Con el tiempo se fue reconociendo que el Túnel Emisor podía dividirse en 5 diferentes tramos, según las características geológicas de las formaciones, confirmándose así con bastante precisión lo vaticinado por las exploraciones; estos tramos era:

- 1.- Sierra de Guadalupe.
- 2.- Formación Tarango.
- 3.- Sierra de Tepotzotlán.
- 4.- Sierra del Sincoque.
- 5.- Arcillas de Nochistongo.

1. Sierra de Guadalupe (Lumbreras 0 a 4)

En la Sierra de Guadalupe los rendimientos fueron en los primeros 3 años por día de trabajo y por frente de casi 2 m. El avance en las rocas dacíticas sanas, poco fracturadas de los domos de Mioceno Superior se verificaba por lo general con facilidad, representando el bombeo un problema menor, ya que los volúmenes infiltrados eran del orden de 5 lts/seg por 100 m de túnel.

2. Formación Tarango (lumbreras 5 a 8)

Esta formación, compuesta de lahares, tobas, suelos y escasos depósitos fluviales, ofreció al principio también pocos problemas.

Las infiltraciones eran por lo general bajas, sumando unos 7 a 10 lts/s en 100m. Los avances eran casi de 1.5 m por día por frente.

3. Tramo Sierra de Tepotzotlán (lumbreras 8 a 14)

En este tramo los volúmenes de agua que había que evacuar, primero durante la construcción de las lumbreras y después en los primeros avances en el túnel, eran extraordinarios. Una secuencia de tobas, arenas, ignimbritas, lavas y conglomerados, formaba un conjunto formacional intensamente fracturado, abundando las fallas dirigidas al NE; se trata aquí de los depósitos pertenecientes a Oligoceno Medio y Mioceno Inferior, que constituyen el basamento volcánico fracturado de la cuenca. Los avances en este tramo fueron obviamente lentos, promediando 0.4 m por día por frente. El agua, requiriendo bombeo intenso, absorbía la energía de los trabajadores y técnicos; los volúmenes infiltrados medían 40 a 100 lts/s y a veces más, llegando a extraer en este período por las lumbreras entre 500 y 800 lts/s.

4. Tramo Sierra del Sincoque (lumbrera 14 a 18)

En este tramo donde se excavaron las lumbreras más profundas, los avances medían 1.7m/día, el agua era un problema, más no tan severo como en el tramo de la Sierra de Tepetzotlán; se infiltraban volúmenes de 6-8 lts/s en cada 100 m. Las lumbreras llegaron a evacuar volúmenes de 200 a 300 lts/s de agua.

5. Tramo de Arcillas de Nochistongo (lumbrera 18 a portal)

Este tramo presentó pocos problemas al principio; las infiltraciones eran insignificantes, del orden de 3 lts/s por cada 100 m. La formación era resistente y la excavación en ella se hacía sin dificultad, lográndose avances medios de 0.8 m por día.

La Situación del túnel en 1970

A finales de 1970 después de 3 años de excavaciones las distintas compañías constructoras operando cada una independientemente en tramos que comprendían 2 ó 3 lumbreras, con el tiempo fueron avanzando menos, principalmente a consecuencia de problemas financieros.

La obra se reorganiza y continúa

A principios de 1971, el Departamento del Distrito Federal ordenó la creación del consorcio denominado Túnel, S.A. (TUSA), que agrupaba los distintos contratistas bajo un mando uniforme. Esto se llevó a cabo para que la Dirección Técnica del Departamento del Distrito Federal, pudiera analizar la formación ingenieril, geológica e hidrológica, logrado previamente en los distintos frentes, para traducirla en una acción directa. Así se fueron estableciendo normas y criterios uniformes de exploración, ataque, ademado, empleo de maquinaria y de movilización de recursos; todo lo cual tuvo frutos, pues la obra en seguida tomó nuevos impulso.

Los nuevos avances promedio que se fueron logrando en los distintos tramos del túnel fueron muy superiores; éstos resultaron para:

La Sierra de Guadalupe de 2.5 m por frente por día.

La formación Tarango de 3.5 m por frente por día.

La Sierra de Tepetzotlán de 2 m por frente por día.

La Sierra Sincoque de 2.5 m por frente por día.

Las Arcillas de Nochistongo de 3 m por frente por día.

Corte geológico general

Una vez terminada la obra, fue posible analizar la geología del túnel de una manera integral. Los distintos cortes detallados logrados de lumbrera en lumbrera

fueron sometidos a un análisis y reinterpretados a la luz de los levantamientos geológicos superficiales de la Cuenca de México, con la ayuda de distintas fechas absolutas logradas en las lavas muestreadas a lo largo del trazo del túnel.

De una manera general puede decirse que el Drenaje Profundo corta de sur a norte las siguientes formaciones volcánicas de la Cuenca:

1. Depósitos lacustres y aluviales del Cuaternario Superior; arcillas y limos.
2. Series Volcánicas del Co. De Santa Isabel y Guerrero, pertenecientes al Mioceno Medio; volcanes estratificados.
3. Serie Volcánica de la Sierra de Guadalupe, correspondiente al Grupo de las Sierras Menores del Mioceno Superior; domos.
4. Serie Volcánica de Barrientos, del Mioceno Medio a Superior; volcanes estratigráficos.
5. Serie Volcánica de la Sierra de Guadalupe; domos.
6. Formación Tarango, representando los abanicos volcánicos derivados de la Sierra de Monte Alto, perteneciente al Grupo de las Sierras Mayores del Mio-Plioceno.
7. Serie Volcánica de Nochistongo del Mioceno Superior; Tobas Rosas al sur de Tepetzotlán.
8. Serie Volcánica de Huehuetoca del Oligo-Mioceno; forma las bases de la Sierra de Tepetzotlán; lavas, ignimbritas, tobas, conglomerados.
9. Serie Volcánica Nochistongo del Mioceno Superior; arcillas bentoníticas endurecidas, probablemente lacustres.

A. Interceptores

El interceptor Central en su trayectoria de sur a norte desde la lumbrera 9 a la lumbrera 0, cortó una secuencia aluvio-lacustre del Cuaternario Superior.

Entre las lumbreras 9 y 13 donde abundaron depósitos limo-arenosos deleznales hubo que avanzar con escudo y aire comprimido, lográndose sin embargo un avance simple y de excavación convencional en la parte del tramo entre la lumbrera 13 y 0.

Interceptor Oriente

Este en su primera parte cortó depósitos lacustres entre el Gran Canal y la lumbrera 8C. A partir de aquí y la lumbrera 12, el interceptor cortó los depósitos de lavas, brechas y tobas del complejo volcánico estratificado compuesto por los Cerros de Guerrero y Santa Isabel del Mioceno Medio. Entre la lumbrera 8B y la lumbrera 11 se cruzó una falla importante, la cual produjo en su relleno de arcillas bentoníticas un caído importante. Entre las lumbreras 12 y 13, el interceptor cortó primero otra secuencia perteneciente al Complejo Santa Isabel y después las lavas sanas del domo del Cerro del Chiquihuite.

Entre la lumbrera 13 y la lumbrera 0 el Túnel cortó sin mayores dificultades la secuencia limo-arenosa poco permeable situada a la entrada del Valle de Cuautitlán.

El Emisor Central

El primer tramo del Emisor Central quedo representado por los domos y los volcanes estratificados del Mioceno Superior en el sur de la Sierra de Guadalupe.

El segundo tramo del Emisor Central correspondiente a la Formación Tarango, Consiste en abanicos volcánicos derivados de la actividad volcánica explosiva de las Sierras de las Cruces, que forma parte del grupo de las Sierras Mayores de edad mio-pliocénica.

El tercer tramo del Emisor corresponde a las bases de la Sierra de Tepetzotlán. Aquí domina, en su mayor parte sepultado por vulcanitas más jóvenes, una secuencia de lavas, ignimbritas, brechas tobas y diques, toda extraordinariamente fracturada y dividida en fosas y pilares. Las fallas confinantes están dirigidas principalmente al nor-este.

El cuarto tramo del Emisor Central corresponde a la misma formación Oligo-Miocénica que la de las bases de la Sierra de Tepetzotlán, aunque separada de ella por una fosa miocénica en cuyo centro se localizó la lumbrera 14. El intenso fracturamiento al noreste y los frecuentes cambios litológicos de esta Serie, persisten, aunque por falta de comunicación de las fracturas con depósitos de agua como el de la Cuenca de México, los volúmenes infiltrados aquí fueron muy inferiores.

El quinto y último tramo del Túnel Emisor se desarrolló en las arcillas bentoníticas endurecidas, probablemente de origen lacustre y pertenecientes al Mioceno.

ESTRATIGRAFÍA

Los sondeos se realizaron a medida que el túnel se iba construyendo. Estas perforaciones se realizaron en forma más profusa dentro de la Ciudad de México en donde el túnel atravesó suelos de muy baja resistencia; en esta zona se realizó un total de 482 sondeos recuperando muestras inalteradas.

En el caso de las rocas, el número total de sondeos efectuados fue de 169 y las muestras obtenidas se clasificaron geológicamente.

En los suelos arcillosos o limosos se utilizaron principalmente muestreadores de tubo de pared delgada de tipo Shelby de un diámetro de 10 cm; en los depósitos de arena y de limo arenoso compacto se emplearon barriles muestreadores tipo Dennison o tipo Mazier de 14.5 cm de diámetro exterior y con muestra de tubo liso de 10 cm de diámetro interior, para máquina rotaria.

El empleo de este doble tubo impide que el fluido de perforación entre en contacto con la muestra por circular entre los dos tubos; impide además que la muestra se altere por la rotación.

Algunos sondeos en roca se efectuaron mediante el sistema integral, que consiste en una perforación de diámetro reducido (2 cm), en la cual se coloca una varilla. A continuación se perfora con una corona de diamante concéntrica de mayor diámetro (8 cm); este tipo de sondeo permitió determinar la magnitud y la inclinación de las fracturas; permitió además una mayor recuperación del material que las rellenaba.

Estratigrafía y propiedades de las formaciones

1) Interceptor central

El interceptor central fue excavado dentro de los depósitos de origen lacustre que forman el subsuelo en la zona urbana de la Ciudad de México. El trazo intersecta la llamada zona de transición del subsuelo de la ciudad, formada por depósitos de limos y arenas. Sobreyaciendo estos depósitos, se localiza una capa de arcilla comprensible cuyo espesor aproximado de 15 m, disminuye a medida que el túnel se aproxima al norte (Tenayuca) y en la lumbrera 0 prácticamente desaparece.

Entre la lumbrera 9 y la lumbrera 11, predominan en el subsuelo depósitos de arcilla comprensible hasta 15 cm de profundidad; entre la lumbrera 11 y la lumbrera 0, predominan los depósitos de arena y limo.

Entre las lumbreras 11 y 13 se encuentran a la profundidad del túnel depósitos de limo con lentes de arena y gravillas prácticamente sin cohesión. En general, las capas del subsuelo presentan un buzamiento hacia el Sur con pendiente muy pequeña (0.005). Entre la lumbrera 13 y la lumbrera 0 la pendiente aumenta considerablemente, hasta llegar a 0.015.

En el depósito superficial, de 4 m de espesor en promedio, está constituido de limos arenosos de bajo contenido de agua (50%), con una resistencia a la penetración estándar del orden de 20 golpes. La primera formación arcillosa se presenta a lo largo del Interceptor Central, con un contenido de agua natural del orden de 300% y con resistencias a la compresión simple aproximadamente de 5 ton/m². Los depósitos inferiores de arenas limosas presentan contenidos de agua menores al 50%, en tanto que los contenidos de agua de las capas de arcilla oscilan entre 100 y 200%. La resistencia a la compresión simple en las arenas limosas varía entre 8 y 20 ton/m².

2) Interceptor Oriente

Se construyó el Interceptor entre el Gran Canal y la lumbrera 8C, en la llamada zona del lago de la cuenca del Valle de México, en depósitos de arcilla de alta plasticidad. En esta zona el túnel va superficial, entre 4 y 10 m de profundidad; por esta razón, se excavó un cajón a cielo abierto relleno con tepetate arriba de la losa superior. La capa superficial de rellenos, limos y arenas tienen un espesor entre 1 y 3 m. El depósito de arcilla que la subyace tiene un espesor del orden de 30 m, excepto en la vecindad de la lumbrera 8C.

La llamada primer capa dura, tiene un espesor entre 3 y 6 m; el contacto de esta capa con la roca en la lumbrera 8C da origen a una zona de alteración con gravas, y fuerte pendiente.

En la vecindad del Gran Canal, la resistencia a la compresión simple de la arcilla disminuye notablemente hasta valores del orden de 1.4 ton/m². A partir de los 7 m de profundidad, la resistencia aumenta a 3.5 y a 4 ton/m².

En la vecindad de la lumbrera 8C, la resistencia a la compresión simple de la arcilla aumenta a valores del orden de 6 ton/m².

Tramo comprendido entre las lumbreras 8C y 8A

En esta zona se encuentran depósitos superficiales de relleno, cuyo espesor aumenta hacia la lumbrera 8A, hasta alcanzar valores del orden de 6 m. En este tramo, los sondeos indicaron la presencia de un antiguo cauce.

Las características del depósito de arcilla entre 4 y 20 m de profundidad son semejantes a las de la zona de transición de la cuenca del Valle de México; el contacto entre la arcilla y la roca basáltica es un depósito de gravas y de arenas empacadas en arcilla de bajo contenido de agua natural, cuyo espesor oscila entre 0.5 y 3 m.

Cabe hacer notar la presencia de un depósito de toba ubicado abajo del basalto cercano a la lumbrera 8C; subyaciendo a este depósito, se encuentra una formación de andesita basáltica.

Tramo ubicado entre las lumbreras 8A y 12

En este tramo, el túnel cruza por una serie de rocas de origen volcánico. En la lumbrera 8A y bajo el cerro de Guerrero, se encuentran lavas basálticas, escorias volcánicas (tezontle) y lapilli.

En estas zonas se produjeron pequeños caídos en el túnel debido a la presencia de arcilla momtomorillonítica ávida de agua.

La lumbrera 11 se excavó en una serie de depósitos estratificados de andesitas basálticas y de boleos empacados en limos arenosos cementados. Continúan los basaltos y las andesitas a partir de este sitio y hasta el cerro de Santa Isabel. Entre este cerro y el llamado del Chiquihuite se encuentra un pequeño valle donde el túnel cruza el río de Los Remedios, cuyo subsuelo está constituido por tobas arenosas del tipo tepetate, con resistencia a la compresión simple es del orden de 1 kg/cm².

Tramo ubicado entre las lumbreras 12 y 13

Entre las lumbreras 12 y 13, el túnel cruza nuevamente por rocas volcánicas (andesitas y dacitas fracturadas); el espaciamiento entre las fracturas en la roca a lo largo de este tramo es muy variable y oscila entre 0.10 y 1m.

Cabe hacer la aclaración que se cruzó una zona de arcilla dura fisurada en el km 2+750, la cual dio origen a fuertes movimientos en los marcos de ademe por su expansión al contacto con el agua y la humedad del túnel. Su resistencia a la compresión simple es del orden de 10 kg/cm² y su contenido de agua natural es del orden del 20 %.

Tramo ubicado entre las lumbreras 13 y 0.

El túnel se excavó nuevamente en depósitos de suelos areno-limosos pertenecientes a la formación Tarango; en este tramo predominan los limos arenosos compactos; a un nivel superficial se encuentra un relleno compacto reciente de un promedio de 5 m de espesor; a continuación se localiza una serie de capas horizontales con espesor variable de arenas limosas y arcillas; su resistencia a la compresión simple varía entre 0.8 y 4 kg/cm² y su contenido de agua natural es menor de 100% , excepto en los lentes de arcilla, cuyo contenido de agua es del orden del 175%.

3) Emisor Central.

Tramo ubicado entre las lumbreras 0 y 1

A partir de la lumbrera 0 y en la vecindad de ésta, el túnel se excavó en depósitos limo-arenosos compactados formando tepetates; en esta zona la dureza del material obligó a emplear nuevamente dinamita para su excavación. En el contacto entre la riolita y el tepetate arenoso localizado en el cadenamiento 1+150 se encontraron fuertes aportaciones de agua; el material en este sitio está constituido por una toba arenosa, compacta, excavada con dinamita.

Tramo ubicado entre las lumbreras 1 y 2

El túnel cruzó bajo los cerros de Santa Cecilia y Tlayapa. En este tramo se presentó una alteración de lavas, aglomerados y tobas. Entre los cadenamientos 2+700 y 3+200, el túnel atravesó depósitos de tobas (tepetates) conteniendo gravas y arenas. Entre el cerro de Tlayapa y el cerro de Santa Cecilia se cruzó una falla que dio origen a un pequeño caído con aportación de agua.

Tramo ubicado entre las lumbreras 2 y 3

Este tramo se excavó en andesitas grises, las cuales afloran en la superficie y se localizan hasta el nivel del túnel. En la superficie están cubiertas de rellenos de un espesor de 1 a 2m. Se presentaron caídos, fundamentalmente en el km 6+050, en donde hubo la necesidad de emplear inyecciones y colados primarios para sostener el terreno; asimismo, a la altura del cadenamiento 6+350 se presentó una zona de fallas con roca muy fracturada.

En la excavación de la lumbrera 3, se encontró una falla muy importante y zonas atacadas por alteración hidrotermal en la andesita.

La lumbrera 3 se excavó desde la superficie en tobas arenosas compactas con poca aportación de agua. A partir de 50m de profundidad, el material se encuentra muy fracturado, y las fracturas rellenas en su mayor parte con arcillas bentoníticas. A partir de los 70m de profundidad, la alteración de la roca es notable, al grado de haberla convertido en una arcilla arenosa; el agua en esta zona se encuentra a una temperatura del orden de 30°C.

Tramo ubicado entre las lumbreras 3 y 4

A partir de la lumbrera 3 y hasta el cadenamiento 7+830, se encuentra una formación de andesita gris rojizo muy fracturada. Dentro de este tramo se localizan zonas atacadas por alteración hidrotermal y zonas con roca desintegrada y con intercalaciones de toba arenosa; hubo aportación de agua con temperatura del orden de 23°C por las fracturas. Una de las fallas más importantes cruzadas en el túnel aparece hasta la superficie, en los cortes de la supercarretera México-Querétaro entre los km 27 y 28.

En el tramo entre el cadenamiento 9+300 y la lumbrera 4, el túnel se excavó en una dacita sana fracturada; en el contacto entre la dacita y la andesita se presentaron aportaciones de agua importantes.

La lumbrera 4 se excavó prácticamente en su totalidad en depósitos de tobas limo-arenosas compactas.

Tramo ubicado entre las lumbreras 4 y 5

Entre la lumbrera 4 y el cadenamiento 10+150 aproximadamente, continúan los depósitos de arena limosa y de limos arenosos compactos formando tepetates; a partir de este cadenamiento y hasta el 10+800 el túnel cruza una formación de andesita muy fracturada que originó aportaciones de agua (0.5 lts/seg/m de túnel), el agua está fundamentalmente en las fracturas del material. Hasta la lumbrera 5, el túnel cruza por los depósitos de la formación Tarango, que están saturados. En algunos tramos, el material consiste fundamentalmente en arenas compactadas sin cohesión; pero en otras zonas se encuentra bien cementado, al grado de que podrían considerarse como areniscas. Cabe mencionar que la presión hidrostática existente en esta zona fue superior a 5 kg/cm² y que, según se observó en algunos barrenos perforados horizontalmente, esta presión disminuyó conforme transcurrió el tiempo.

Tramo ubicado entre las lumbreras 5 y 6

El túnel pasa por depósitos de la formación Tarango; el subsuelo en este tramo está constituido por capas de limos y arenas, de conglomerados y de la combinación de conglomerado con brechas andesíticas; el conglomerado se encuentra con matriz tobácea.

En todo el tramo había aportaciones de agua por las fracturas del material; la zona de mayor aportación fue, como se ha señalado, la zona vecina a la lumbrera 5.

Tramo ubicado entre las lumbreras 6 y 7

Los sondeos efectuados en este tramo, se puede observar una secuencia estratigráfica formada por suelos fundamentalmente arcillosos en la superficie; a continuación depósitos de lahar, dentro de los cuales hay limos y limos arenosos que forman bolsas de material con diferentes grados de cementación. Se encuentran depósitos de pómez a partir del cadenamiento 14+800 hasta el 15+400 aproximadamente y las aportaciones de agua en el tramo fueron relativamente pequeños, del orden de 0.1 lts/seg/m de túnel.

Tramo ubicado entre las lumbreras 7 y 8

El túnel cruzó depósitos de la formación Tarango y la estratigrafía descrita entre las lumbreras 6 y 7 sigue siendo la misma; fundamentalmente, el agua aparece en las fracturas de la toba. No se presentaron arrastres de material hacia el túnel por

efecto del agua; en general, la resistencia de la toba es superior a 5 kg/cm², medida en prueba de compresión simple.

Tramo ubicado entre las lumbreras 8 y 9

El túnel continúa por depósitos de la formación Tarango (tobas limoarenosas) hasta 2 kilómetros aguas abajo de la lumbrera 8. A partir de este punto, las tobas disminuyen en resistencia hasta valores cercanos a 1 kg/cm², en prueba de compresión simple.

El tipo de depósitos (arena con muy baja cohesión) aunado a la presión hidrostática, que en esta zona es mayor de 4 kg/cm², provocó un caído de gran magnitud, una falla que cruzó el túnel en el cadenamiento 21+620, la cual limita la formación de ignimbrita y los depósitos de tobas limo arenosas. Cabe mencionar que en la vecindad de los contactos con la roca, la resistencia de las tobas aumenta y su relación de vacíos disminuye, presentándose más compactas.

Tramo comprendido entre las lumbreras 9 y 10

La lumbrera 9 se excavó superficialmente en depósitos de limo hasta 46 m de profundidad, a continuación se encuentra un conglomerado arenoso de 10 m de espesor, por este conglomerado se tuvieron aportaciones de agua durante la excavación, subyaciendo al conglomerado se encuentran depósitos de andesita fracturada. Finalmente entre 95 y 115 m de profundidad, se encuentra una formación de ignimbrita por la cual se inicio la construcción del túnel. El túnel se excavó dentro de la reolita alterada en una longitud aproximada de 800m; el grado de alteración en el material es muy variable. Se encuentran zonas donde la roca se ha convertido en arcilla del tipo montmorillonita con mucha avidez por el agua y por lo tanto expansiva. En algunos tramos de esta zona, los marcos fueron desplazados por el material al contacto con el agua y la humedad del túnel; la roca presenta una microfacturación muy importante y esto provoca una mayor facilidad en su expansión.

Tramo ubicado entre las lumbreras 10 y 11

A partir de la lumbrera 10, el túnel se excavó en la formación de la brecha limo arenosa, compacta y cementada hasta el cadenamiento 25 + 150, en donde aparece un contacto con la reolita alterada descrita en el párrafo anterior.

Entre los cadenamientos 26+000 y 26+350 se detectó una zona de falla con desplazamientos entre bloques del orden de 70 cm, a partir del cadenamiento 26+800, el túnel se excavó en un conglomerado compacto y cementado donde se cruzaron 3 fallas de pequeña magnitud, por las cuales hubo aportación de agua hacia el interior del túnel.

Tramo ubicado entre las lumbreras 11 y 12

El túnel se excavó en una formación de basalto fracturado hasta 800 m aguas abajo, donde se cruzó una falla, entrando el túnel a una formación de conglomerado con boleos hasta de 30 cm de diámetro, con una matriz areno limosa. El conglomerado se encuentra bien cementado y dio lugar a fuertes aportaciones de agua, principalmente por las grietas y por las fallas que cruzó el túnel.

Tramo ubicado entre las lumbreras 12 y 13

Los primeros 30 m de profundidad se excavaron en un tepetate (toba arenosa compacta), a continuación y hasta 160 m de profundidad, se excavó en tobas y arenas semejantes a los de la formación Tarango; el inicio del túnel fue excavado en depósitos del mismo tipo hasta 100 m aguas debajo de la lumbrera. El túnel atravesó una capa de brechas, basálticas con las fracturas rellenas de caolín, hasta el cadenamiento 31+330, en donde entra en contacto con una formación de basalto y brechas basálticas muy compactas.

Tramo ubicado entre las lumbreras 13 y 14

La lumbrera 13 se excavó hasta 30 m de profundidad en depósitos de tobas limoarenosas compactas; y hasta 90 m de profundidad, se excavó en depósitos de tobas pumíticas con poca aportación de agua. A partir de 90 m y hasta la profundidad de 150 m, la lumbrera atraviesa la formación de basalto, de escorias y de brechas; sin embargo, la profundidad del túnel, las aportaciones de agua y presión hidrostática que tenía la roca hicieron necesario efectuar un tratamiento a base de inyección de cemento, debido a la presencia de una zona de falla en la cual se encontró la escoria volcánica (tezontle) empacada en limos y arcillas arenosas.

Tramo ubicado entre las lumbreras 14A y 14

A partir de los 130 m de profundidad, en donde la brecha de matriz carbonatada entra en contacto con el basalto vesicular amigdaloides y hasta los 160 m de profundidad, la lumbrera 14A se excavó en un material de alta permeabilidad (basalto vesicular) con fuertes aportaciones de agua (300 lts/seg). El túnel atravesó la formación del basalto vesicular hasta 800 m aguas debajo de la lumbrera 14A. Ahí se presentó una falla y el túnel se excavó a partir de este punto en dos materiales distintos. En la media sección superior, dentro del conglomerado bien soldado y permeable con matriz arcillo arenosa; y en la media sección inferior, en el basalto compacto fracturado con zonas de escoria volcánica.

Tramo ubicado entre las lumbreras 14 y 15

A partir de la lumbrera 14 y hasta 600 m aguas abajo, el Emisor Central atravesó el conglomerado permeable. A partir de este cadenamiento y hasta 900 m aguas

abajo, el túnel cruzó por depósitos de basalto, de brechas y de arcillas tobáceas, en una secuencia estratigráfica hasta la zona de falla en donde entró en contacto con una formación de arcilla roja tobácea, rígida y fisurada. Esta formación cruzó el túnel en 150 m de longitud aproximadamente hasta una siguiente zona de falla, en donde se presentaron planos de deslizamiento con materiales típicos de fallas, tales como cericita y caolín.

Finalmente, los 400 m restantes del tramo fueron excavados dentro de una formación de basalto fracturado.

Tramo ubicado entre las lumbreras 15 y 16

La lumbrera 15, que es la más profunda del Emisor Central, se excavó hasta 225 m, atravesando formaciones de tepetate, de basalto y de brechas volcánicas. En la profundidad del túnel el basalto entra en contacto con una brecha con matriz arcillosa y piedras de basalto. El túnel se excavó hasta 400 m aguas abajo en este material, interrumpiéndose a 300 m por un material arcilloso conteniendo materiales afallados y algunos planos de deslizamiento. El túnel se excavó nuevamente en el basalto fracturado y permeable a partir del cadenamiento 37+680 hasta la lumbrera 16.

Tramo ubicado entre las lumbreras 16 y 17

A partir de la lumbrera 16 y hasta 150 m aguas abajo, el Emisor Central se excavó en una roca basáltica con numerosas fracturas rellenas de caolín. El material por el que se excavó el túnel en este tramo puede clasificarse en tres tipos:

1. Basalto fracturado en tonos gris oscuro y rojo, con pequeñas zonas de alteración.
2. Arcilla roja rígida y quebradiza, poco permeable.
3. Brecha volcánica con fracturamiento muy intenso y matriz limoarenosa bien cementada.

Tramo ubicado entre las lumbreras 17 y 18

A partir de la lumbrera 17 hacia aguas abajo, se aparece un basalto fracturado permeable. En la vecindad del cadenamiento 41+320 se encuentra el contacto basalto-toba; esta última continúa hasta el cadenamiento 41+700; ahí se localiza nuevamente el basalto, que continúa hasta el cadenamiento 42+200; en este cadenamiento se localiza una falla de rumbo sensiblemente Oriente-Poniente, apareciendo hacia aguas abajo una arenisca conglomerática compacta muy cambiante. Se observaron fuertes aportaciones de agua durante la excavación y el basalto en el contacto, se encontró lajeado, razón por la cual se reforzó la protección de los marcos metálicos en esta zona. La arenisca está fracturada, con agua abundante a lo largo de las fracturas. El conglomerado resultó muy permeable, con clásticos gruesos y con abundantes filtraciones. 200 m aguas arriba de la lumbrera 18, la arenisca se presentó muy fracturada y con pequeñas

fallas. En esta zona se colocó el ademe provisional del túnel con reforzamientos, poniendo los marcos uno junto a otro y colando la cubeta de concreto. Finalmente en la vecindad de la lumbrera 18, se encuentra el basalto fracturado y permeable.

Tramo ubicado entre la lumbrera 18 y el portal de salida del Emisor Central

En la lumbrera 18 el basalto fracturado entra en contacto con las margas calcáreas de la formación Requena; en la vecindad de la lumbrera 18, las margas calcáreas son de color café rojizo claro. En esta zona aproximadamente 160 m aguas arriba de la lumbrera 18, hubo un caído en el túnel de magnitud considerable.

Las margas calcáreas se pueden clasificar como limo arenoso de color gris verdoso y de consistencia muy dura. El material queda comprendido dentro del grupo MH, que corresponde a limos de alta plasticidad; el peso volumétrico varía entre 1.6 y 1.8 ton/m³; la resistencia a la compresión simple está comprendida entre 8 y 25 kg/cm²; el contenido de agua natural varía de 35 a 45%; de su densidad relativa de sólidos está comprendida entre 2.4 y 2.6 con relación de vacíos desde 0.8 hasta 1.3; se encuentran 100% saturado y presentó poca expansibilidad bajo saturación; sin embargo, al aliviar la presión a la cual se encontraba sometido, el material se deforma.

Salvo el caído que se produjo cerca de la lumbrera 18 y otro ocurrido después de la excavación entre las lumbreras 19 y 20, el material no presentó problemas de inestabilidad.

INSTRUMENTACIÓN

El programa de instrumentación y ensayos in situ en los túneles del Emisor Central y de los interceptores tuvo como objetivo recabar información que permitiera calibrar los procedimientos adoptados en el diseño del soporte temporal y definitivo.

Los sitios escogidos para las estaciones de instrumentación y pruebas de carga fueron representativos de unidades litológicas que aparecían en grandes extensiones del túnel. Las pruebas de geosísmología aportaron información de casi todas las formaciones litológicas que atravesó la obra.

Procedimientos de medición y resultados

Estaciones de instrumentación

Las mediciones en las estaciones de instrumentación se efectuaron en dos periodos: del 26 de julio de 1968 al 30 de abril de 1969 y del 24 de diciembre de 1971 al 15 de enero de 1973.

En el segundo período las estaciones estuvieron integradas por los aparatos siguientes:

- a) Extensómetros longitudinales instalados en el interior de los túneles para la observación de los desplazamientos del terreno normales al eje del túnel en un cierto número de puntos fijos, en la zona de influencia de la excavación.
- b) Celdas de carga instalados entre los tramos de los marcos de acero para medir las cargas soportadas por éstos.
- c) Extensómetros longitudinales instalados en la superficie del terreno natural para medir desplazamientos desde antes del paso de la excavación por la estación de medición.
- d) Extensómetros portátiles para medir la distancia entre los puntos fijos de la pared interior del túnel en una sección transversal, para observar la variación de su geometría.
- e) Anclas de tensión instrumentadas con celdas de carga para registrar las tensiones que se producen paralelamente a los desplazamientos hacia la excavación.
- f) Celdas de presión instaladas en cada punto de contacto entre el terreno y los marcos de acero para medir la magnitud y la distribución de las cargas transmitidas (debido al gran número de celdas de presión necesarias, sólo se emplearon en una estación).

Con base en la teoría de Protodyajonov, se supo que la zona de material que se relaja o se “suelta” en la parte superior del túnel tiene la forma de una parábola de ancho b igual al ancho de la excavación y altura h dada por la ecuación:

$$h = b/2f$$

Donde f , que se denomina factor de resistencia, tiene los valores siguientes:

$f = \tan \Phi$ en suelos friccionantes
 $f = \tan \Phi + c/\sigma_c$ en suelos cohesivos
 $f = \sigma_k/100$ en rocas
 Φ = ángulo de fricción interna
 c = cohesivo
 σ_c = resistencia a la compresión uniaxial
 σ_k = resistencia a la compresión en especímenes cúbicos

Como el área de la parábola es:

$$A = 2bh/3$$

La carga vertical $2V$ que gravita sobre los soportes del túnel en un metro de longitud en el sentido vertical, en el sentido del eje del túnel es:

$$2V = \gamma b^2/3f$$

o despejando f :

$$f = \gamma b^2/6V$$

donde:

γ = peso volumétrico del material relajado
 V = carga sobre un lado del soporte

Por lo tanto el factor de resistencia f , puede evaluarse conociendo la altura de la parábola de relajación o la carga V que actúa sobre cada pata en los marcos.

Pruebas de Carga

Por medio de placas rígidas de un tercio de metro cuadrado de área de contacto, se aplicaron rocas al techo, al piso y a las paredes laterales de los túneles. Esto fue hecho en seis ciclos de carga, con una velocidad de aplicación de 2.5 kg/cm² por minuto.

El dispositivo para la aplicación de las cargas consistió en una estructura de acero de seis y medio toneladas de peso, además de tres gatos hidráulicos activados en forma simultánea.

Los desplazamientos del terreno se observaron mediante cuatro micrómetros sujetos a una estructura rígida, liviana y empotrada en el terreno en sitios fuera de la influencia de las cargas.

Para el cálculo de los módulos elásticos se emplearon las fórmulas siguientes:

$$E = (1-\nu^2/2\Delta\delta)\Pi R\Delta\sigma$$

Cuando las mediciones de desplazamiento se ejecutaron sobre las placas y

$$E = (1 - \nu^2 / 2\Delta\delta) R \sigma - I (R/r \Delta\sigma)$$

Cuando las mediciones de desplazamientos se efectuaron directamente sobre el terreno, a una distancia (r-R) de las placas.

En las fórmulas anteriores:

E Módulo de elasticidad

ν Relación de Poisson

R Radio de la placa

r Distancia del punto de medición de desplazamiento al centro de la placa

σ Esfuerzo aplicado, cuya magnitud se obtiene dividiendo la carga aplicada entre el área de contacto de las placas y el terreno.

δ Desplazamiento vertical inducido por la carga aplicada.

$\Delta\sigma$ Intervalo de esfuerzos seleccionado en la gráfica de esfuerzo-desplazamiento (σ, δ)

$\Delta\delta$ Intervalo de desplazamiento seleccionado en la gráfica esfuerzo-desplazamiento

Estudios geofísicos

En su mayor parte, los estudios geofísicos fueron geosísmicos de refracción. También se efectuaron sondeos eléctricos de resistividad, combinados con los geosísmicos.

Los estudios geosísmicos de refracción se efectuaron principalmente con un equipo portátil marca Bison con canales separados para geófono, horizontal y vertical. Este equipo permite detectar la onda S (onda transversal o cortante) con el geófono horizontal y la onda P (onda longitudinal o de compresión) con el vertical. Este procedimiento produjo resultados altamente confiables, a pesar de las condiciones de humedad del ambiente, del alto nivel de ruido y de la presencia de revestimiento de concreto lanzado en algunos tramos.

Nivel superficial de los Interceptores

Los tramos estudiados son el Interceptor Central de la lumbrera 9 a la lumbrera 13; y en el Interceptor Oriente únicamente el tramo del Gran Canal a la lumbrera 8^a.

Las nivelaciones se empezaron a correr a partir de octubre de 1973, la periodicidad fue de aproximadamente cada mes. Los asentamientos que aquí se consignan incluyen la nivelación hasta 1975.

Los bancos que se utilizaron para efectuar estas nivelaciones, se desplantan en la capa resistente a 35 m de profundidad. Inicialmente se refirieron al banco inamovible de Atzacolco observando movimientos prácticamente despreciables, por lo que se consideraron como puntos fijos.

DISEÑO

Con base en las características geométricas de los Interceptores y el Emisor definidas por los estudios hidrológicos e hidráulicos a las propiedades mecánicas de los materiales y las recomendaciones emanadas por el estudio geológico; así como las mediciones de cargas y deformaciones realizadas in situ, se procedió al diseño del soporte temporal del túnel formado principalmente por tres sistemas:

- a) Dovelas de concreto armado
- b) Marcos metálicos con sección H
- c) Concreto lanzado

En total se realizó el diseño estructural de 50 km de revestimiento de túnel en el Emisor bajo diferentes solicitaciones, 18 km de revestimiento de túnel para los Interceptores, las obras de toma del Gran Canal, de los ríos Los Remedios, Tlalnepantla, San Javier y Cuauhtepac, se diseñaron las obras derivadoras de los colectores 15, 11, Humboldt y Río Consulado y la obra del Portal de Salida.

DISEÑO DE ESCUDOS

A) Antecedentes

El objeto de un escudo es prevenir la deformación del terreno hacia el túnel mediante una coraza de metal, al mismo tiempo que se colocan las dovelas que sirven como ademe provisional del túnel. El escudo es un cilindro de metal, rígido, que para fines de diseño, puede dividirse en tres secciones; la parte delantera formada por una cuchilla que va cortando el material, una estructura intermedia que sirve para rigidizar la coraza y alojar los sistemas hidráulicos que empujan el escudo, y en la parte trasera una coraza cilíndrica en donde se coloca el ademe provisional, o sean las dovelas.

En los escudos empleados para la excavación de los interceptores, se tenían plataformas de trabajo en el frente del escudo, las cuales se accionaban hidráulicamente funcionando como gatos, para proporcionar apoyo del ademe de madera utilizado en el frente. El escudo contiene 25 gatos traseros para apoyo y empuje del escudo hacia el terreno, estos gatos se accionaban al mismo tiempo si el escudo iba en la línea correcta y en tramos de tangente, en caso contrario, se accionaban parcialmente en la sección en donde el escudo necesitaba girar, al mismo tiempo que se colocaban las aletas estabilizadoras alojadas en la parte delantera del escudo.

B) Estructura y dimensiones de los escudos

El elemento principal de los escudos fue la coraza constituida por placas de acero soldadas y roladas en tal forma que guarden la dimensión máxima de la excavación del túnel (en este caso de 6.2 m).

C) Proceso de análisis para el diseño de los escudos

Los lineamientos seguidos para el cálculo de los escudos, y las hipótesis de diseño empleadas en los mismo fueron los siguientes:

Profundidad de excavación	= 34 m
Peso volumétrico máximo del suelo	= 1.76 ton/m ³
Diámetro del escudo	= 6.2 m
Longitud	= 6.4 m

Las partes que fundamentalmente fueron diseñadas son las siguientes:

a) Faldón del escudo. El faldón es el elemento que gobierna el diseño de la coraza del escudo, para este diseño se tomaron las siguientes hipótesis:

1. La presión actuante sobre el escudo es a nivel del mismo, igual a γh .
2. La distribución de presiones alrededor del escudo es mayor en la clave que el diámetro horizontal, y la reacción del escudo, por lo tanto, es inversa, o sea, el escudo se deformará aplastándose formando una elipse con eje mayor horizontal.

La carga uniforme sobre la coraza del escudo al nivel del diámetro horizontal será la presión por el radio, aplicando un factor de seguridad a esta carga.

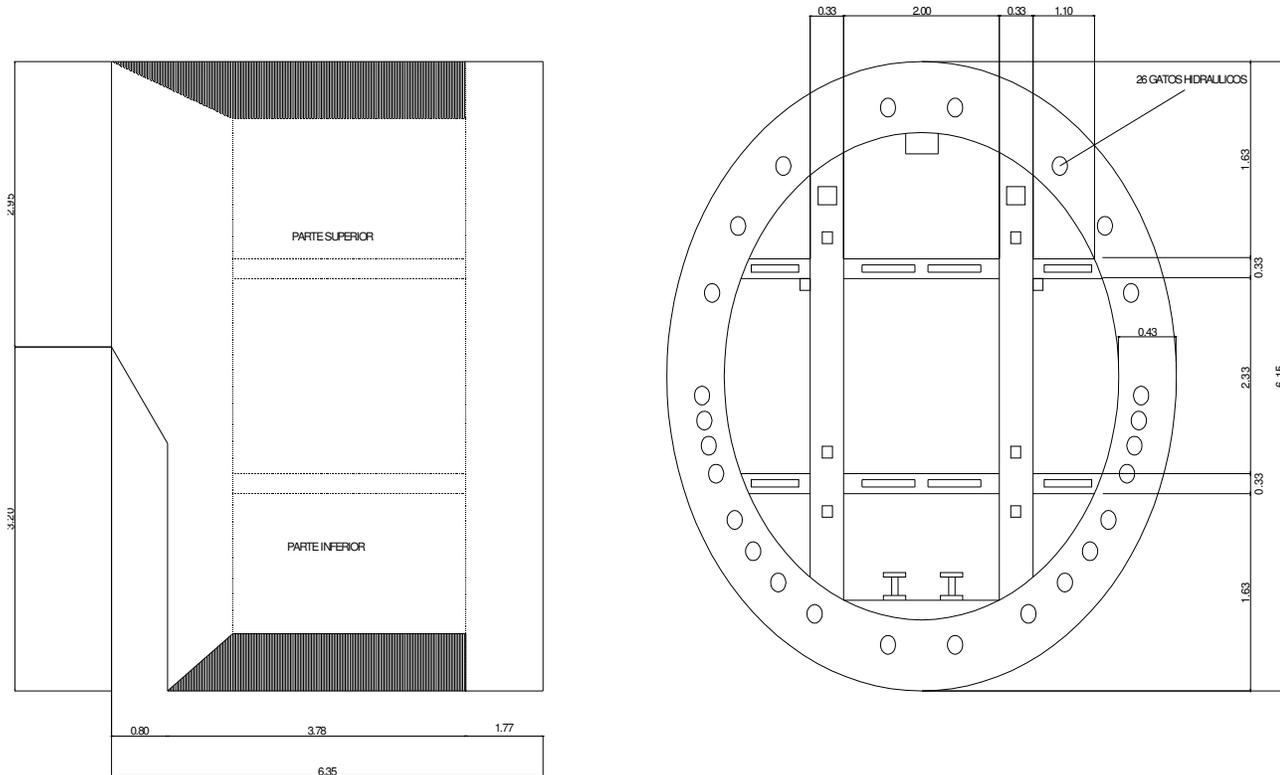
La carga por flexión en el escudo determinó también que el valor del espesor del faldón sería igual a 2", espesor se obtuvo aplicando la teoría de la elasticidad.

b) Postes y plataformas. Los postes deberán ser diseñados para tomar la diferencia de cargas entre la presión total vertical y la presión horizontal que se consideró como una hipótesis del orden del 60 % de la carga vertical. La parte central del escudo es en donde se encuentran los postes y la plataforma.

c) Gatos de empuje. El número total de gatos será el necesario para vencer la resistencia del escudo a avanzar, que es función de la adherencia entre el suelo y la camisa del escudo. Por otra parte, se deberá vencer la resistencia del suelo en el frente del escudo.

- Para el caso de los interceptores, se obtuvieron 26 gatos de 8" de diámetro cada uno, con capacidad del orden de 200 ton/gato; este número de gatos, considera un factor de seguridad.

- d) Gatos frontales. Los gatos frontales y las plataformas delanteras se diseñaron para resistir un empuje del frente de la excavación en forma triangular, considerando un valor del coeficiente de empuje activo de Rankine igual a 0.33 para el caso de arenas. El número de gatos obtenidos para esta condición, tomando en cuenta un factor de seguridad, resultó igual a 16.



DIMENSIONES DEL ESCUDO DEL INTERCEPTOR CENTRAL

Esquema 2: Diseño de Escudo

Interacción Suelo Estructura

Criterio de diseño

El revestimiento final del túnel se diseñó plásticamente, utilizando las especificaciones del Reglamento de Construcciones del Departamento del Distrito Federal, en su capítulo relativo a diseño plástico.

Se consideró la combinación más desfavorable de los sistemas de cargas actuando en el revestimiento. Los tres sistemas de cargas que se consideraron fueron:

- a) Sistema formado por la presión exterior radial uniforme de agua y presión interior radial uniforme.
- b) Sistema constituido por:
 - 1. Presión radial exterior de agua, creciente linealmente con la profundidad, con valor nulo en la clave del túnel y máximo en la plantilla (si el nivel freático está sobre la clave del túnel).
 - 2. Presión radial interior de agua, creciente linealmente con la profundidad, con valor nulo en la clave y máximo en la plantilla.
 - 3. Peso propio del revestimiento, incluyendo el peso del mortero de inyección.
 - 4. Reacción de la roca en la plantilla del revestimiento, uniformemente distribuida.
- c) Sistema formado por:
 - 1. Presión vertical uniforme en la clave y en la base del revestimiento.
 - 2. Presión horizontal uniforme a ambos lados del revestimiento.

Las hipótesis de cargas sobre el revestimiento se tomaron de la teoría de Protodyakanov, y las fórmulas para determinar la presión horizontal fueron deducidas por D. Reséndiz, tomando en cuenta la interacción roca-revestimiento.

Parámetros de diseño.

Para cada tramo de túnel, la posición del nivel freático y la presión piezométrica al nivel del túnel, se determinaron por mediciones directas entre dos lumbreras consecutivas.

Los valores del peso volumétrico, del módulo de elasticidad y del factor de resistencia del suelo o roca que intervienen en la fórmula de Protodyakonov, se establecieron para cada formación con base en los siguientes factores:

1. Experiencia en otros sitios, publicada en literatura.
2. Experiencia local propia en el túnel, de diseños previos.
3. Mediciones directas mediante pruebas de resistencia en el laboratorio, pruebas de placa en el túnel y mediciones geosísmicas por refracción.
4. Información sobre el comportamiento del material durante el proceso de excavación.
5. Información geológica recopilada por recorridos en el interior del túnel y por la superficie, así como análisis petrográficos.

Las propiedades mecánicas de las formaciones de roca por las que el túnel cruza, que se tomaron como punto de partida para el diseño del revestimiento definitivo, varían entre los siguientes límites.

1. Peso volumétrico natural. De 2.4 ton/m³ en rocas sanas, hasta 1.4 ton/m³ en suelos arcillosos.
2. Módulo de elasticidad de la roca. De 200 000 kg/cm² en las rocas más competentes, hasta 1 100 kg/cm² en suelos arcillo-limosos.
3. Factor de resistencia. De 5 en roca sana, hasta 0.3 en la arcilla con contenidos de agua mayores a 200%.
4. Velocidad de ondas de cortante. De 1 500 m/seg en rocas, a 180 m/seg en arcillas.
5. Angulo de fricción interna. Entre 40° y 15°.

Con los parámetros así determinados, se efectuaron análisis de tres tramos típicos del Emisor Central y del Interceptor Oriente. En base a estos análisis preliminares, se llevó a cabo un programa de instrumentación para medir cargas y deformaciones en la excavación.

Una vez calibrado el proceso de análisis, se aceptaron las hipótesis iniciales y se procedió a diseñar el revestimiento en el resto del túnel.

Diseño Estructural

A) Diseño de los interceptores Oriente y Central

Para diseñar cualquier tramo de los interceptores, fue necesario obtener los parámetros de diseño, tales como profundidad, peso volumétrico, nivel de aguas freáticas, ángulo de fricción interna, módulo de elasticidad, factor de resistencia (parámetro empírico que depende de las características mecánicas de las formaciones), y la velocidad de la onda "S" de cortante, fue necesario tomar en cuenta que en determinado momento los interceptores pueden estar sujetos a presión interior de acuerdo a las necesidades de funcionamiento hidráulico, que para este caso, es mayor que la presión hidrostática exterior.

Con base en las condiciones de trabajo y ubicación de los interceptores, se analizaron las siguientes solicitudes:

- a) Nivel piezométrico abatido hasta el nivel de clave del túnel (peso volumétrico saturado) y túnel vacío.
- b) Nivel piezométrico abatido y túnel funcionando a presión.
- c) Efectos debidos a temblores.
- d) Hundimientos diferenciales a largo plazo.

A partir de los datos de cada tipo de suelo que atraviesan los interceptores, se calcularon las presiones horizontal y vertical, tanto por la condición del túnel vacío como funcionando.

Debido a que la presión hidrostática interior es mayor que la piezométrica exterior, la condición que predominó en el diseño fue la de túnel funcionando. Al analizar y diseñar la condición antes mencionada, se llegó a la necesidad de especificar acero de refuerzo en toda longitud de los interceptores.

Las ondas “S” de cortante, medidas en las formaciones que el túnel cruzó, señalaron que tendrían efectos importantes de sismo; sin embargo, esta condición no predominó en el diseño del revestimiento.

Con base en el análisis de hundimientos efectuado en algunos tramos de los interceptores, no fue necesario adicionar acero de refuerzo por este efecto, dado que la magnitud de los posibles movimientos resultó pequeña. Lo anterior se comprobó en las mediciones de hundimientos efectuadas en esta zona.

B) Diseño del Emisor Central

Para el diseño del revestimiento, se analizaron varias condiciones de trabajo y efectos instantáneos y a largo plazo, tales como:

- a) Peso volumétrico sumergido y túnel vacío.
- b) Peso volumétrico sumergido y túnel funcionando.
- c) Efectos debidos a temblores.
- d) Hundimientos a largo plazo.

Debido a la posición del nivel de aguas freáticas, sobre la clave del túnel se generan fuerzas de compresión muy importantes sobre el revestimiento del túnel. Estos efectos de compresión se tomaron empleando concreto simple y especificándose acero de refuerzo únicamente en las uniones de las lumbreras con el túnel, en el tramo comprendido entre la lumbrera 21 y el Portal de Salida. El acero de refuerzo fue necesario debido a una menor presión hidrostática exterior y a la importancia de los efectos de temblores.

Tomando en cuenta la importancia de las fuerzas de compresión, y con el objeto de eliminar el acero de refuerzo, fue necesario manejar en forma adecuada dos aspectos básicos en el diseño del revestimiento.

1. Emplear espesores mínimos de 35 cm.
2. Resistencia a compresión del concreto congruentes al espesor y a la sollicitación del tramo que se trata, (se emplearon resistencias a compresión del concreto desde 220 hasta 320 kg/cm²).

Para determinar los efectos de hundimientos diferenciales a largo plazo, se hicieron análisis de hundimientos en algunos tramos del Emisor Central.

C) Diseño de unión de lumbreras con túnel

La sollicitación para la cual debe diseñarse la unión de una lumbrera con el túnel es la flexión producida por ondas sísmicas de cortante, suponiendo que inducen en la lumbrera o en el túnel una curvatura máxima.

$$1/R=0.4g/V_s^2$$

En donde:

g = aceleración de la gravedad

V_s = velocidad de ondas de cortante

R = radio de curvatura al flexionarse la lumbrera por las ondas sísmicas

De acuerdo a la hipótesis de Navier y a la expresión mencionada se deduce que para el cálculo del movimiento flexionante debido a temblores se requiere la siguiente información:

- a) Velocidad de la onda "S" de cortante.
- b) Módulo de elasticidad del suelo.
- c) Diámetro interior de la lumbrera.
- d) Módulo de elasticidad del concreto.

Calculado el momento flexionante debido a sismo, se procede al diseño del revestimiento de la lumbrera.

Considerando que para el funcionamiento del Sistema del Drenaje Profundo es más importante en túnel que la lumbrera, se juzgó conveniente protegerlo ante la acción de un temblor, para ello se limitó la cantidad de acero de refuerzo de la lumbrera que debe ligarse con el revestimiento del túnel, con objeto de disminuir el valor de la fuerza de compresión.

D) Obras exteriores

Se han clasificado como obras exteriores todas aquellas estructuras que se han construido en superficie, con el objeto de derivar las aguas negras del Gran Canal,

de los colectores y de los ríos a los interceptores, así como las estructuras necesarias para la operación y vigilancia del Sistema de Drenaje Profundo del Distrito Federal.

Estas obras son las siguientes:

- a) Obra derivadora del Gran Canal.
- b) Obra de captación del colector Río Consulado.
- c) Obra de captación del colector Humboldt.
- d) Obra de captación del colector 11.
- e) Obra de captación del colector 15.
- f) Obra de captación del Río Tlalnepantla.
- g) Obra de captación del Río de los Remedios.
- h) Obra de descarga del Emisor Central.
- i) Estructuras para vigilancia y operación del sistema.

Por sus características geométricas, procedimiento de excavación y diseño, las obras, se clasifican en 3 grupos:

Grupo 1, obra derivadora del Gran Canal y obras de captación de los colectores Río Consulado, Humboldt, 11 y 15. Grupo 2, obras de captación de los ríos de Los Remedios y Tlalnepantla. Grupo 3, estructuras del Portal de Salida, casetas de vigilancia, puentes de maniobras y casetas de plantas de emergencia.

Estructuras del grupo 1

Las estructuras de este grupo están desplantadas entre 10 y 14 m de profundidad, y normalmente localizadas en centro de calles o camellones de avenidas.

Tomando en cuenta que estas estructuras tienen pequeñas pendientes hidráulicas, fue necesario compensar cargas para limitar posibles asentamientos diferenciales. Las cargas máximas que se transmiten al terreno varían de acuerdo con los siguientes límites:

Sobrecompensación	0.5 ton/m ²
Sobrecarga	0.2 ton/m ²

Debido a que estas obras se ubican en zonas donde no se cuenta con espacio suficiente para hacer excavaciones por medio de taludes, fue necesario colar muros de concreto en zanjas además con bentonita, cuyo ancho en ningún caso fue mayor 0.6 m.

Los muros antes mencionados se diseñaron para las siguientes solicitaciones:

- 1) Empuje del suelo.
- 2) Sobrecarga de 1.0 ton/m²
- 3) Presión hidrostática.

Los cajones de conducción formados básicamente por losa inferior, muros laterales de concreto, losa superior a base de elementos preesforzados, se analizaron como marcos cerrados sujetos al siguiente sistema de cargas:

- a) Reacción del terreno.
- b) Empujes laterales debidos al suelo, presión hidrostática y sobrecarga.
- c) Cargas en losa superior debidas a su peso propio (precolados y firme), sobrecarga de 1.0 ton/m^2 y peso del relleno sobre el hasta el nivel de calle o camellón.

Por necesidad de operación de las compuertas así como de las agujas, las cajas de captación de los colectores no quedaron totalmente enterrados, sino que el lecho alto de la losa superior quedó ligeramente encima del terreno natural.

Estructuras del grupo 2.

Las excavaciones para construir estas estructuras se hicieron por medio de taludes, ya que se encuentran ubicadas en zonas donde se contó con espacio adecuado para seguir este procedimiento.

- a) Obra de toma.
- b) Zona de control.
- c) Rápida o cimacio.
- d) Tanque amortiguador.
- e) Cajón de conducción.
- f) Cámara espiral.
- g) Lumbrera.

La rápida, tanque amortiguador y el cajón de conducción, se analizaron como marcos cerrados sujetos a las cargas que se describen para las estructuras del grupo 1, respetándose en cuanto a cimentación los límites de sobrecarga y sobrecompensación especificados anteriormente.

Estructuras del grupo 3.

Estas estructuras se analizaron por medio del método de Hardy Cross y se diseñaron elásticamente empleando para su análisis las cargas vivas que especifica para cada caso en particular el Reglamento de Construcción para el Distrito Federal.

Las cimentaciones se diseñaron a base de zapatas corridas desplantadas a los niveles necesarios.

DISEÑO DE CIMBRAS

En general las presiones de diseño para cada cimbra son variables dependiendo del método de vaciado del concreto.

DISEÑO ELECTROMECAÁNICO

Para controlar el escurrimiento de las aguas negras a través del Sistema del Drenaje Profundo del Distrito Federal, se ha diseñado una serie de estructuras de concreto dotadas de compuertas de diversos tipos, según las necesidades de operación del Sistema. Estas compuertas son operadas por dispositivos mecánicos que permiten abrirlas o cerrarlas para controlar el gasto de aguas negras que deben de llevar los interceptores y el Emisor en un momento dado de acuerdo con la época del año y las precipitaciones pluviales que ocurran en ella.

A) Compuertas radiales

Consiste esencialmente en una placa de acero en forma de un sector cilíndrico rigidizado por viguetas y unidas a dos brazos que pasan por el eje del cilindro; en este punto se colocan chumaceras en cada brazo. La forma cilíndrica de la compuerta tiene por objeto transmitir la presión hidrostática siempre en sentido perpendicular a la compuerta, y por lo tanto, las fuerzas que obran en cada punto de la placa concurrirán al centro del cilindro, y la resultante pasará por las chumaceras que se localizan en este eje.

El mecanismo que sirve para operar esta compuerta es un malacate doble tambor, donde se enrollan los cables que se fijaron a la compuerta por medio de orejas. La operación de levantar la compuerta se efectúa eléctricamente por medio de un motor-reductor central, que consiste en un motor eléctrico trifásico de inducción, acoplado directamente a un reductor de velocidad del tipo de corona y tornillo sinfín encerrado en una caja de fierro fundido que contiene el aceite lubricante.

B) Compuertas deslizante

El material más resistente a la corrosión por las aguas negras, es el fierro fundido y cuando las dimensiones de las compuertas lo permitieron, se fabricaron de este material.

La hoja está constituida por una placa plana soportada por una serie de costillas horizontales y verticales, y con medios para fijar el vástago que sirve para su operación. En el lado opuesto a las costillas y en el perímetro de la hoja, se colocaron sellos maquinados.

En este tipo de compuertas, la presión del agua contra la hoja produce fuerzas de fricción en los ellos, que impiden que la hoja baje por su propio peso, por lo cual fue necesario instalar un mecanismo para obligar a la hoja a bajar mediante un vástago rígido

C) Compuertas rodantes

Estas compuertas se han instalado en las lumbreras 0a y 0b, así como en las cajas de captación de los colectores Río Consulado, Humboldt, 11 y 15. En estas estructuras también se instalaron compuertas deslizantes fabricadas con acero estructural, ya que por sus dimensiones no fue posible hacerlas de fierro fundido.

La elección de este tipo de compuertas se hizo tomando en cuenta las grandes dimensiones que se requirieron y el espacio para operarlas.

D) Agujas

En todas las estructuras que llevan compuertas, se instalaron “agujas” inmediatamente aguas arriba de las compuertas, con el objeto de cerrar el paso del agua cuando se requiere darles mantenimiento.

Estas “agujas” deben operarse siempre en aguas quietas, ya que no operan satisfactoriamente en agua con corriente.

Las agujas se colocan una por una en ranuras que se dejaron ex profeso en las pilas y muros laterales, hasta que la última sobresalga del nivel máximo que puede alcanzar el agua en el canal o caja de captación, según sea el caso.

E) Especificaciones

Con objeto de controlar en forma adecuada la fabricación y montaje de todas las compuertas descritas anteriormente, se elaboraron especificaciones para cada tipo de compuerta. Se establecieron procedimientos de fabricación, tolerancias, embarques, montaje y pintura.

F) Plantas de emergencia

Estas plantas de emergencia son operadas por motores de gasolina. Se instalaron en la obra derivadora del Gran Canal y en los colectores Río Consulado, 11, 15 y Humboldt.

CONCRETOS

EL concreto para el revestimiento de los túneles, además de cumplir con los requisitos de resistencia estructural, durabilidad, estabilidad volumétrica y baja permeabilidad, necesitaba tener una trabajabilidad adecuada a las condiciones de manejo.

Dado que el concreto estará en contacto con aguas negras, es necesario mejorar su resistencia al ataque de los sulfatos utilizando cementos con bajo contenido de aluminio tricálcico.

La resistencia de proyecto fijadas por el diseño estructural estaban comprendidas entre 220 y 320 kg/cm². La resistencia más baja correspondió a los tramos de túnel de la lumbrera 0 a la 5 del Emisor Central; la más alta, entre los frentes de la lumbrera 9 a la 10 y de la lumbrera 16 a la 17 del Emisor; en los interceptores Central y Oriente la resistencia predominante fue de 270 kg/cm².

La sección revestida presentaba espesores mínimos del orden de 45 cm, excepto en zonas locales en donde era necesario ajustar el espesor de diseño y en los tramos excavados utilizando escudo y dovelas, en los que los espesores del revestimiento se reducía a 25 cm.

El tamaño máximo del agregado estuvo condicionado por los espesores reducido, así como por el transporte del concreto en su etapa final, utilizando bombas de pistón o neumáticas y tubería rígida de 15.2 cm de diámetro interior; dicho tamaño se limitó a 38 mm.

Para establecer los revestimientos más adecuados se consideró la pérdida de fluidez motivada por el transporte del concreto; distancia de acarreo a la superficie, altura de caída a través de las lumbreras o pozos de bombeo, distancia de acarreo en el interior del túnel y longitud de la línea de bombeo; para compensar dicha pérdida, el revenimiento medido en la planta de concreto se especificó de 14 +/- 2 cm.

La base para la verificación de calidad del concreto fue la resistencia a compresión simple de cilindros estándar, fabricados de acuerdo a las normas establecidas y ensayados a la edad de 28 días.

Una probabilidad máxima del 10% de que una muestra individual presentara una resistencia de proyecto $f'c$ (220 y 320 kg/cm²). Una probabilidad del 2% de que una muestra individual tuviera una resistencia inferior a 0.86 $f'c$; la resistencia promedio requerida se calculó considerando un coeficiente de variación de partida de 15%, lo que da lugar a un factor de sobre estimación de 1.24 respecto a la resistencia de proyecto.

ADITIVOS

El empleo de aditivos para el concreto del revestimiento estuvo encaminado básicamente a mantener el grado de plasticidad de las mezclas de manera de garantizar su colocación, consolidación y acabado. Para compensar la pérdida de la plasticidad durante el transporte se usó un aditivo reductor de agua, que permitía especificar mayores revenimientos de partida en la planta dosificadora, sin detrimento de la resistencia y de las otras propiedades deseables del concreto.

ELECCIÓN DE MATERIALES

Se llevaron a cabo estudios para la localización de bancos de agregados que los suministraron, cumpliendo con las condiciones de calidad establecidas y ubicadas a distancias convenientes de acarreo. El área investigada a lo largo de la línea, se inicia en la zona minera del Poniente del Distrito Federal y termina en Tepeji del Río en el Estado de Hidalgo.

Se analizaron los materiales de los bancos en producción, así como los susceptibles de explotación, los cuales se ubicaron relacionándolos con la posición del trazo del túnel.

El procedimiento seguido para el estudio de los materiales con posibilidades de aprovechamiento, con excepción de los bancos 1 y 2 que se encontraban en producción, consistió en realizar sondeos o excavar pozos a cielo abierto, tomando las muestras necesarias para efectuar las pruebas preliminares de laboratorio.

El agregado fino aprobado provino principalmente del banco No. 2, ubicado al Poniente de San Bartolo Naucalpan, Estado de México, y en menor proporción del banco No. 9 ubicado al Norte de Tepeji del Río; en ambos casos se requerían instalaciones para clasificarlos.

El muestreo se realizó utilizando un barril muestreador doble, con broca y rima de diamante, obteniéndose corazones de 5 cm de diámetro; las muestras se clasificaron de acuerdo a su profundidad.

En términos generales puede decirse que las arenas presentaron mayores variaciones en su uniformidad; esto motivó que se tuvieran que hacer ajustes frecuentes en los proporcionamientos de partida para lograr mantener la uniformidad necesaria en el concreto producido.

AGUA DE MEZCLADO

El agua utilizada para producir concreto se obtuvo directamente de la red municipal. En los tramos de túnel donde se presentaban filtraciones importantes, se determinaron sus características físicoquímicas para dicho fin; a partir de los resultados obtenidos, se descartó el agua de filtración proveniente del tramo comprendido entre las lumbreras 12 y 8B del Interceptor Oriente. En el Emisor Central la calidad del agua fue adecuada.

CEMENTO

Es conocido que los componentes químicos que determinan las características de un cemento, los aluminatos cálcicos son los más susceptibles al ataque de los sulfatos contenidos en suelos o aguas negras, reduciendo considerablemente la durabilidad del concreto. La reacción entre aluminatos y sulfatos da lugar a que se formen cristales de sulfo-aluminato cálcico que provocan aumento de volumen, con la consiguiente desintegración progresiva del concreto. Existen otros compuestos, producto de la descomposición de la materia orgánica contenida en las aguas negras, que se manifiestan como gases corrosivos, ácido sulfídrico y anhídrido carbónico, sumamente agresivos.

La ventilación natural que existirá a través de las lumbreras permitirá el arrastre continuo de esos gases, lo cual constituye la mejor medida preventiva en ese sentido.

Dada la importancia de la estructura, se decidió protegerla utilizando cemento tipo V con bajo contenido de aluminato tricálcico.

Para la elaboración de todo concreto que esté expuesto al contacto con aguas negras, se usó cemento tipo Portland tipo V, el cual debía cumplir con las siguientes especificaciones:

Requisitos Químicos

Oxido de magnesio	4.0% máx.
Anhídrido sulfúrico	2.5% máx.
Pérdida por calcinación	3.0% máx.
Residuo insoluble	0.75% máx.
Aluminio tricálcico	
Ferroaluminato tetracálcico, Más dos veces el aluminato tricálcico	20.0% máx.
Silicato tricálcico	40.0% máx.
Alcalis totales solubles	0.60% máx.

Requisitos Físicos

Finura como superficie específica en Blaine	3000 cm ² /g mín.
Sanidad, en autoclave	0.80% máx.
Tiempo de fraguado, Gillmor: inicial	1 hora mín.
Tiempo de fraguado, Gillmor: final	10 horas máx.
Resistencia a compresión a 7 días	105 kg/cm ² mín.
Resistencia a compresión a 28 días	210 kg/cm ² mín.
Fraguado falso Penetración 2,3 ó 4	25 mm mín.

El cemento tipo V fue producido por una fábrica ubicada en Tula, Hidalgo, cuya capacidad mensual de 45 000 toneladas se destinaba normalmente a fabricar, mediante el proceso húmedo, cemento tipo I; las necesidades de cemento tipo V para el Sistema de Drenaje Profundo motivaron que se alternara la fabricación de ambos tipos de cemento. Los consumos de cemento en dicha obra, en un período de 35 meses, representaban un promedio general de 15 000 toneladas mensuales; en el último semestre de la fase constructiva, el promedio fue cercano a 30 000 toneladas por mes.

Para comprobar la calidad del cemento antes de su envío a la obra, se tomaba una muestra por hora, para analizarla y determinar, en un plazo perentorio, si los componentes más significativos del cemento tipo V tales como: alúmina, óxido férrico o cal libre, presentaba variaciones anormales, lo cual permitía tomar las medidas correctivas necesarias en su caso. También se realizaban pruebas físicas de finura y eventualmente de fraguado falso con dichas muestras.

Diseño de Mezclas

Para el diseño de las mezclas se siguieron los principios básicos de proporcionamiento de concreto de peso volumétrico normal. Los proporcionamientos de partida se establecieron en función de la resistencia de proyecto, tomando en cuenta el factor de sobre diseño.

En todos los casos se hicieron mezclas de prueba y se ajustaron los requisitos de agua y la relación de grava-arena de manera de obtener la fluidez adecuada, asimismo se muestrearon cilindros para ensayarlos a compresión a diferentes edades y se determinó el contenido de aire y el peso volumétrico.

A partir de las mezclas mencionadas se dieron los proporcionamientos para la resistencia de proyecto 220, 250, 270, 300 y 320 kg/cm².

El uso de agregados procedentes de distintos bancos así como las variaciones de sus propiedades físicas hicieron necesaria la adopción de tolerancias que

permitieron modificar las cantidades de materiales indicados en dichos proporcionamientos; así, se permitió una variación en la relación agua-cemento de +/- 2% y un intercambio entre gravas y arenas hasta un máximo de 5%.

CONTROL DE CALIDAD

El control de calidad comprendió la verificación de los requisitos establecidos para los materiales utilizados, así como el control de las características del concreto fresco en las etapas de producción, transporte y colocación en su posición final y por último, la comprobación de sus propiedades una vez endurecido.

Para controlar la producción del concreto fresco se llevó a cabo la verificación periódica de los sistemas de pesaje y medición de las dosificadoras, asimismo se estudiaron los tiempos mínimos de mezclado para obtener la uniformidad necesaria en la mezcla. Con respecto a los agregados, en los laboratorios de campo se hacían las correcciones al proporcionamiento de partida por contaminaciones granulométricas en las dos fracciones de grava y en la arena, una vez por turno, en cada planta de concreto.

Cabe mencionar que el peso volumétrico fue la base para la obtención de los volúmenes producidos en todas las plantas de concreto, en función del peso registrado de los ingredientes; en cada turno de trabajo se tomaban seis lecturas del peso volumétrico.

CAPITULO 3
EVALUACION DEL DRENAJE PROFUNDO (DF)

EVALUACION

A partir de la década de los años ochenta, con el propósito de no suspender las inspecciones al Emisor Central durante la época de estiaje, éstas se efectuaron utilizando equipo anfíbio, mediante el cual el personal con equipo de seguridad, efectuaba el recorrido en el túnel accediendo por la lumbrera L-0 hasta el Portal de Salida. En varias ocasiones el recorrido no pudo ser concluido por volcadura de la lancha. La inspección en estas condiciones resultaba muy peligrosa, además de que la velocidad adquirida por la lancha a causa del flujo de agua y la escasa iluminación de las lámparas de mano, no permitían la observación adecuada de las condiciones del túnel. Prácticamente lo único que se podía detectar era la presencia de las filtraciones mayores.

Este procedimiento fue desechado, utilizando en su lugar un “tractor agrícola que remolcaba plataformas sobre llantas”, en las cuales se acomodaba el personal con su equipo de seguridad, herramientas, llantas de refacción, planta generadora de energía, unidad de iluminación, etc. En estas condiciones, con el desplazamiento a velocidad controlada, fue posible obtener mayor información de las condiciones del Emisor Central, procediendo a su mantenimiento en las zonas puntuales que lo requería.

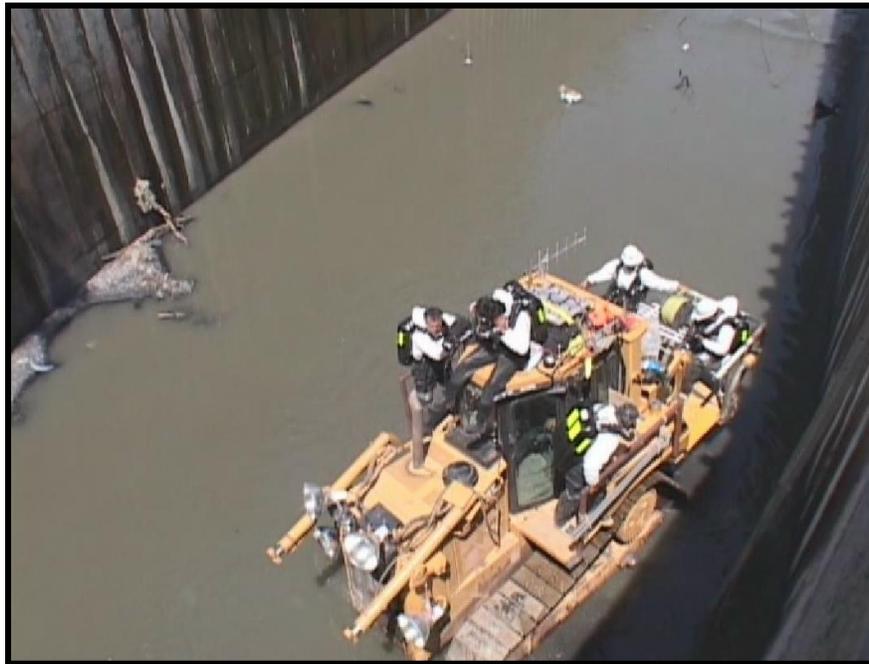


Foto 6: Inspección al Emisor Central

Sin embargo, la pérdida de eficiencia del Gran Canal de Desagüe, a consecuencia de la disminución de su pendiente hidráulica en sus primeros 20 km, continuó agravándose cada año, por tal razón las autoridades de la ciudad decidieron

cambiar la vocación del Sistema de Drenaje Profundo: de ser el principal desfogue en la temporada de lluvias, se convierte en Drenaje Sanitario permanente, al tener que funcionar también en estiaje, razón por la cual, a partir de este momento, no se pudieron realizar las inspecciones y mantenimientos correspondientes.

En el año 1999, la Dirección de Operación del Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACM), quien tiene a su cargo la operación del Sistema de Drenaje Profundo, informa que se ha observado una disminución importante en la conducción y desalojo de aguas del Emisor Central, pues en la época de lluvias ya no trabaja a toda su capacidad (220 m³/s) como ocurría en años anteriores, pues en el portal de salida se habían aforado gastos considerablemente menores al gasto de diseño, asimismo durante las tormentas más intensas algunas lumbreras llegaban a tomar carga.

Esta situación indujo a suponer la existencia de anomalías o accidentes a lo largo del Emisor Central, razón por la cual en la siguiente época de estiaje, el SACM realizó inspecciones al túnel utilizando "lanchas no tripuladas", provistas de cámaras de video para filmar los recorridos desde la lumbrera L-0 hasta el Portal de Salida (PS).

En el estiaje del 2004-2005 se realizó una primera inspección al Emisor Central, con el objetivo primordial de recorrer el tramo entre las lumbreras L3 y L4, y constatar las condiciones del túnel. Se utilizó un vehículo anfibia no tripulado, únicamente equipado con cinco videocámaras y acondicionado con lámparas de halógeno; las observaciones a las imágenes obtenidas permitieron detectar el deterioro del concreto en la clave del túnel, con acero de refuerzo expuesto; la presencia de escurrimientos de agua en la clave y en ambos costados. No se obtuvieron imágenes de la cubeta del túnel, debido a que el tirante de agua era entre 70 y 80 cm. De esta primera inspección se concluyó que no existían daños estructurales graves en el tramo recorrido del Emisor Central.

Por otra parte, la falta de eficiencia del Gran Canal de Desagüe, condujo a la construcción de una planta de bombeo de 42 m³/s sobre su cauce, a la altura del Canal de la Draga, con objeto de desalojar el agua del Gran Canal hacia la zona en donde la pendiente del canal permite su escurrimiento natural, la planta de bombeo, se puso en operación en el año 2002.

En el estiaje de 2005-2006, se realizó una nueva inspección en el Emisor Central, en los tramos comprendidos entre las lumbreras 9A-10 y de la lumbrera 17 hasta el Portal de Salida.

Después de analizar los videos, se concluyó que existían filtraciones de agua, y se evidenció la existencia de tramos con exposición del acero de refuerzo en costados y clave; además, debido a que en ciertos tramos los movimientos de la lancha son rápidos, se consideró que existían obstáculos y desgaste en la cubeta del túnel. Se sugirió que en el siguiente estiaje personal especializado realizara un

recorrido completo del Emisor Central, para lo cual se debería realizar una serie de trabajos previos para “secar” el túnel.

A mediados de 2007 se inició la construcción de cuatro plantas de bombeo: Gran Canal km 11 + 600 (21 m³/s), Casa Colorada Superficial (20 m³/s), Canal de Sales (10 m³/s) y Vaso del Cristo (9 m³/s), mismas que han entrado en funcionamiento y posibilitan el cierre de la obra de toma del Gran Canal al Interceptor Oriente para efectuar la inspección y mantenimiento del Emisor Central a partir de la época de estiaje 2008, contribuyendo a un mejor funcionamiento del sistema de drenaje superficial.

En los siguientes meses se realizaron una serie de acciones tendientes a incrementar la capacidad de desalojo mediante la infraestructura de drenaje superficial, y de esta forma estar en condiciones de proteger a la ciudad ante la presencia de tormentas fuera de temporada, cuando se estuvieran realizando los trabajos de mantenimiento al Sistema de Drenaje Profundo.

En paralelo, se realizaron otro conjunto de actividades encaminadas a aislar el Sistema de Drenaje Profundo, que permitieran el desvío de las aguas residuales que se le estaban descargando hacia el Gran Canal del Desagüe, el Emisor del Poniente y el Río Churubusco. A inicios de 2008, El Sistema de Aguas de la Ciudad de México realizó una nueva inspección al Emisor Central, en esta ocasión fue realizada por personal técnico del SACM y empresas supervisoras y constructoras. Para llevar a cabo este recorrido dentro del Emisor Central, fue necesario realizar una serie de trabajos previos que impidieran las aportaciones de aguas residuales al conducto.

Los daños que se encontraron en el túnel fueron en el recubrimiento de concreto observándose el acero de refuerzo expuesto en algunos sitios, además de filtraciones localizadas en las boquillas de inyección y en las juntas de colado.

También las lumbreras presentan daños ocasionados por el ataque de los gases que emanan del túnel.

La operación del Sistema de Drenaje Profundo durante la temporada de estiaje de varios años (conduciendo únicamente aguas residuales), le generó dos problemas a los conductos: primero, en la parte superior del túnel, un ataque químico producto de los gases que se generan por las aguas residuales que circulan; a este respecto, cabe señalar que la instalación de filtros de carbón activado o algún equipo similar destinado a eliminar los gases que son expulsados a través de las lumbreras y que ocasionan molestias a la población residente a los alrededores de las mismas, también influyen para tener una mayor concentración de gases en los túneles.

En segundo lugar se tiene el desgaste de la parte inferior y los costados del conducto, producto de la abrasión por arrastre de fondo así como por transportar material en suspensión.

El concreto para el revestimiento de los túneles fue diseñado para cumplir los requisitos de resistencia estructural, durabilidad, estabilidad volumétrica y baja permeabilidad; además necesitaba tener una trabajabilidad adecuada a las condiciones de manejo, transporte y colocación en su posición final; desde el punto de vista hidráulico debería tener una superficie terminada lisa, y debido a que estaría en contacto con aguas negras, era necesario mejorar su resistencia al ataque de sulfatos utilizando cementos con bajo contenido de aluminato tricálcico.

Las resistencias de proyecto fijadas por el diseño estructural estaban comprendidas entre 220 y 320 kg/cm².

Como se mencionó, a consecuencia de la actual operación del sistema, el desgaste alcanzado en el piso del conducto se debe a la intensa y constante abrasión del concreto, ocasionada por el arrastre de sólidos contenidos en el agua; en el caso de los costados del túnel, el desgaste se debe al material que se encuentra en suspensión; y en la clave, se debe al ataque químico producto de los gases generados por las aguas residuales.

De las revisiones realizadas al drenaje profundo se encontró que a lo largo de él, en algunas zonas se tiene concreto erosionado, concreto con acero de refuerzo expuesto o ya sin acero y en la cubeta se presenta una erosión, en algunos tramos, de aproximadamente 30 cm de profundidad.

Como se mencionó, a consecuencia de la actual operación del sistema, el desgaste alcanzado en el piso del conducto se debe a la intensa y constante abrasión del concreto, ocasionada por el arrastre de sólidos contenidos en el agua; en el caso de los costados del túnel, el desgaste se debe al material que se encuentra en suspensión; y en la clave, se debe al ataque químico producto de los gases generados por las aguas residuales.

Con el objeto de conocer el funcionamiento hidráulico del Sistema del Drenaje Profundo en estas condiciones, se realizó por parte del Instituto de Ingeniería de la UNAM, un estudio para determinar los coeficientes de rugosidad con que cuentan cada uno de los túneles actualmente, dentro de sus conclusiones, el estudio señala que para la condición inicial el gasto de diseño de 172.778 m³/s con un coeficiente de rugosidad equivalente mínimo de 0.0126, es bastante real para las condiciones en que se terminó la obra, en cambio, para la condición actual y aceptando el coeficiente de rugosidad máximo calculado, lo cual es correcto debido al deterioro del conducto, se tiene que el Q máximo puede variar entre 136.644 a 98.707 m³/s, con un coeficiente de rugosidad de 0.016 a 0.0221, respectivamente, por lo que debido al desgaste del conducto su capacidad podría estar disminuida hasta en 70 m³/s.

Considerando las reparaciones realizadas al Emisor Central, cabe esperar que el coeficiente de rugosidad varíe entre 0.0155 y 0.0143, lo que permitiría conducir un

gasto entre 140.831 y 153.066 m³/s, con ello se lograría tener un 80% de la capacidad de diseño original.

Antes de iniciar los trabajos de rehabilitación, se determinó el tipo de daño que presenta el Sistema de Drenaje Profundo en sus diferentes túneles y tramos, con el fin de iniciar las acciones correctivas sin duda de los procedimientos a emplear, por lo que de las inspecciones realizadas en las últimas temporadas de estiaje, se constataron los daños existentes al revestimiento de concreto, determinándose los siguientes 5 tipos de daños en los túneles: desgastes en la superficie del concreto, acero de refuerzo expuesto, rotura y pérdida del mismo en las zonas de unión del túnel con las lumbreras; oquedades, humedades, filtraciones y flujos a presión manifestados a través de fisuras, grietas, juntas de colado y posiblemente en las boquillas de inyección de contacto; obstrucciones en la cubeta y daños en la misma por los efectos de la abrasión que ha provocado el arrastre de materiales.

También se podrán presentar obstrucciones originadas por la acumulación de azolve en sitios donde el acero de refuerzo de la cubeta se encuentre expuesto, roto y doblado.

Definidos los tipos de daño, se realizó un análisis para ubicar con certidumbre los tramos de cada túnel donde estos se presentan, y con ello, lograr una correcta planeación de las actividades previas a realizar, así como la definición de los procedimientos constructivos, y la utilización de los diferentes materiales e implementación de los equipos adecuados para el correcto desarrollo de los trabajos, definiendo así el denominado Plan Estratégico.

A gran escala los objetivos que se establecieron en el plan estratégico fueron los siguientes:

1. Realizar una evaluación detallada del tipo de daños, la cantidad, magnitud y ubicación de los mismos, determinando las condiciones de cada túnel.
2. Elaborar un programa de acciones para la Rehabilitación del Sistema de Drenaje Profundo, que contemple los procedimientos y especificaciones de los trabajos y materiales a aplicar.
3. Atender prioritariamente las zonas más dañadas del Emisor Central y de los Interceptores Central y Oriente.

Para el desarrollo de los trabajos de rehabilitación se consideró lo indicado por el Sistema de Aguas de la Ciudad de México, referente a que los trabajos de rehabilitación se realizarán durante las temporadas de estiaje, periodo que permite el cierre de las captaciones, debiéndose adoptar un protocolo de seguridad para desalojar las instalaciones ante eventuales lluvias que pudiesen presentarse durante la ejecución de los trabajos.

A finales del año 2008, el gobierno del Distrito Federal encabezado por el Lic. Marcelo Ebrad Casaubón, Jefe del Gobierno Capitalino recorrió cerca de mil 455 metros, donde pudo constatar el grave deterioro que presentaba la estructura del Drenaje Profundo, en el cual se pudieron observar fisuras y grietas en el concreto

que por 33 años ha servido para desalojar las aguas negras de la Ciudad de México.

Cientos de varillas oxidadas salían de entre el concreto desgastado. “Aceros expuestos”, basura, árboles de navidad y restos de colchones colgaban del acero expuesto.



Foto 7: Deterioro en Clave del Drenaje Profundo

En la primera etapa de rehabilitación del drenaje profundo fue posible inspeccionar detalladamente el Emisor Central determinando su estado físico en la clave sin poder conocer con precisión los daños en la cubeta, por el nivel del agua dentro del túnel.

En el caso de los Interceptores, sólo fue posible un rápido recorrido con el apoyo de un equipo UNIMOG.

Para la segunda etapa de rehabilitación, los trabajos serán orientados a los tramos más dañados.



Foto 8: Inspección en Cubeta



Foto 9: Unimog

Con la aplicación de materiales innovadores y resistentes al ataque de bacterias al concreto, se reiniciaron los trabajos de recubrimiento de alrededor de 2.5 kilómetros de las paredes del Drenaje Profundo, que tendrán una vida útil de 15 años.

Concluida la temporada de lluvias y bajo la coordinación del Sistema de Agua de la Ciudad de México (SACM), las empresas contratistas regresan a las profundidades de la ciudad, donde continuarán con la aplicación de soluciones permeables a todo tipo de ataques químicos que garantizan que los ductos trabajen sin contratiempos por otros 15 años más, cuando se volverá a requerir de un mantenimiento mayor como el que inició hace dos años.

Dichos materiales son el Nuklad 105, un adhesivo de alta penetración al poro de concreto, y dos recubrimientos de alta resistencia a la tensión, el 210-S y 210-G, con la finalidad de que las paredes queden tersas.

Parte de un estudio publicado en ese entonces de los investigadores Roberto Meli, Roberto Sánchez Ramírez y Carlos J. Mendoza, del Instituto de Ingeniería de la UNAM, manifestaba que en una inspección al emisor central con cámaras sin operador se había encontrado que “la oxidación del acero de refuerzo es generalizada a todo lo largo del túnel, pero con distintos grados de severidad”.

Las varillas del concreto salían hasta 40 centímetros de la superficie de las paredes del ducto; en diversos puntos había basura que taponaba la corriente del agua, boquetes en el concreto, además de “altos grados de corrosión” de cemento y varillas, por lo que se tuvo que quitar concreto con un grosor de hasta 30 centímetros, durante el mantenimiento.

“Se veían daños en la parte de la cubeta y la bóveda se veía atacada por los gases; en cualquier momento se pudo haber generado una gran inundación”. Esa inundación pudo haber paralizado una parte importante de la ciudad, que es donde se localiza el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México y hacia el norte en la zona de San Juan de Aragón e inclusive la Alameda Central. Todos estos puntos hubieran quedado a 4 o 5 metros de profundidad.

Y eso ocurría por la falta de mantenimiento. En 2007, las autoridades tenían dos escenarios: colapso total del drenaje o taponamiento por la presencia de basura detenida por la varilla.

En ese momento el diagnóstico realizado por científicos del Instituto de Ingeniería de la UNAM, era que los daños estaban siendo ocasionados por el flujo de agua que al arrastrar todo a su paso dañaba el concreto, pero también por el ataque de los gases de ácido sulfúrico generado por los desechos que llevan las aguas negras.

Estudios del Instituto de Ingeniería de la UNAM muestran que en 2007 el emisor, a raíz de las inspecciones anuales que se hacían hasta hace 15 años, se detectaron problemas de filtraciones, pues la construcción no había sido bien sellada.

El interior (del Drenaje Profundo) es como el vapor de un sauna, y ese vapor lleva bacterias que se depositan en la parte alta del tubo”, que es donde estaba más dañado: de la parte media hacia arriba.

“Se perciben filtraciones en diversas partes del túnel, la mayoría son simples escurrimientos, pero algunas son chorros de distintas magnitudes... Las zonas más dañadas son al principio y al final del túnel y cerca de la lumbrera 12”, detallaba el estudio de la UNAM

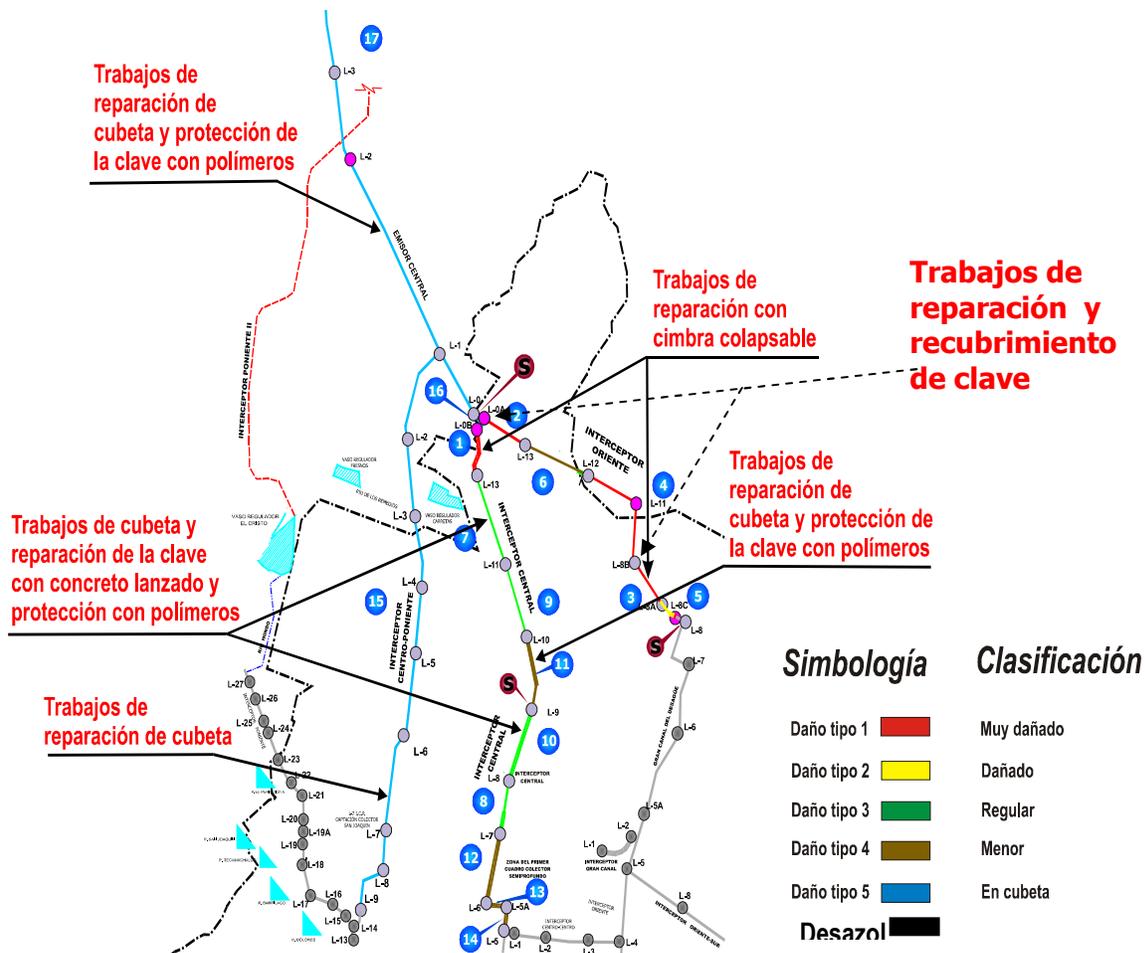
TIPOS DE DAÑOS

Debido al caudal que maneja el Sistema del Drenaje Profundo, tanto en épocas de estiaje como en épocas de lluvia, el túnel sufrió severos daños en la parte superior del túnel (clave), parte inferior (cubeta), y en los muros (tablas).

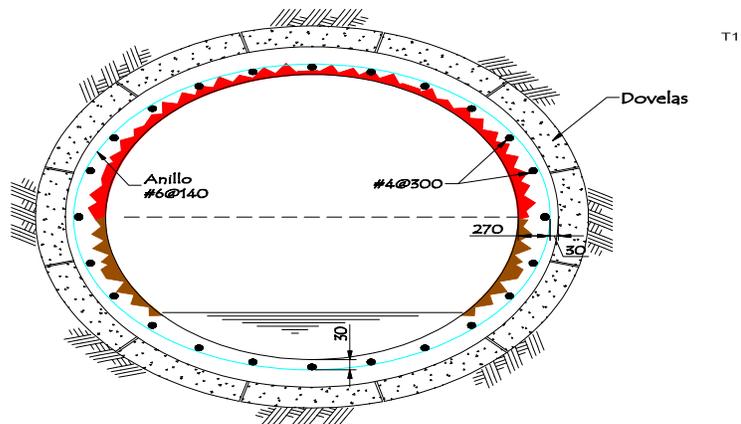
Estos daños se deben a que en épocas de estiaje el túnel operaba al 50 % de capacidad, lo cual provocó que la clave del túnel quedara descubierta y sufriera daños por la acumulación de gases que se desprende de las aguas negras.

El gas principal que desprenden las aguas negras es el Ácido Sulfhídrico, el cual dañó varias secciones del túnel, a tal grado de desaparecer el concreto y acero casi por completo.

Estos daños para darle mantenimiento fueron divididos en 5 tipos de daños, los cuales se muestran a continuación:



Esquema 3: Ubicación de Tramos por Tipos de Daños



Daño tipo 1: Daño en la media sección superior. Requiere sustitución de acero y recubrimiento en el revestimiento definitivo

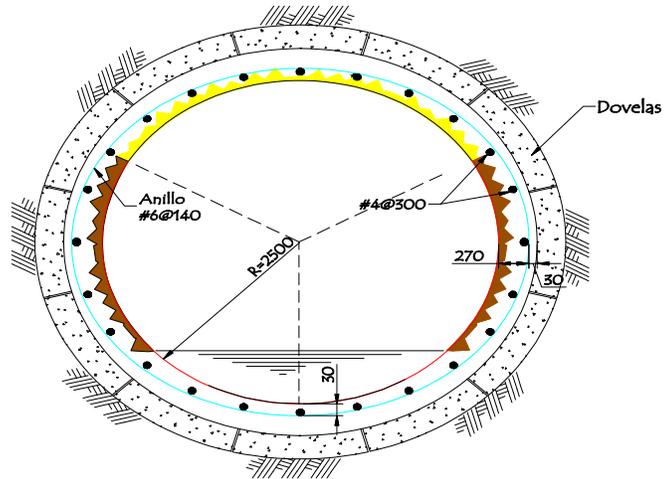
Foto 10: Tramo L13-L0A
Interceptor Oriente



Foto 11: Tramo L8B-L8
Interceptor Oriente



Foto 12: Interceptor Oriente



Daño tipo 2: Daño en 1/3 de la sección superior. Requiere sustitución de acero y recubrimiento del revestimiento definitivo

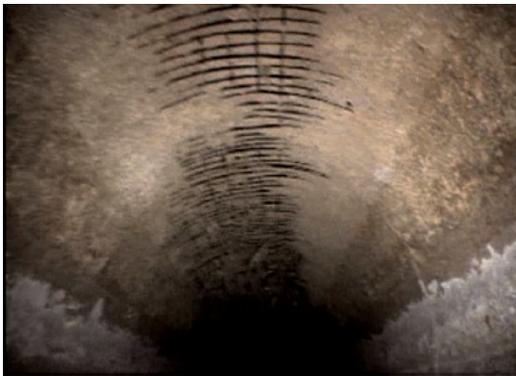


Foto 13: Tramo L8C-L8A
Interceptor Oriente



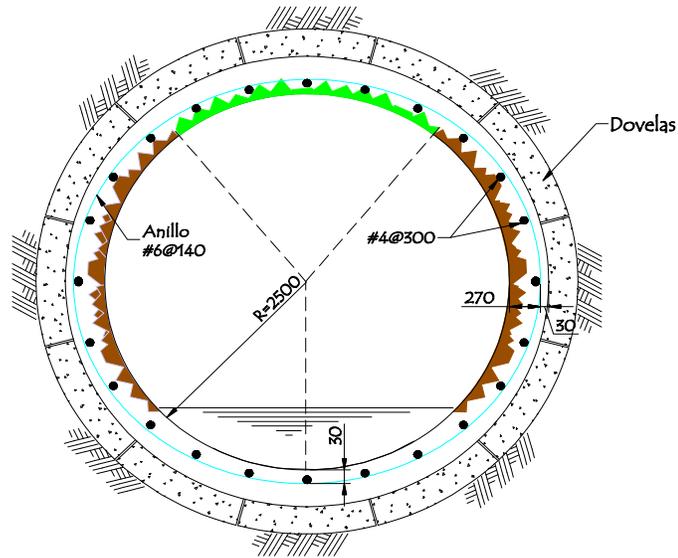
Foto 14: Tramo L8A-L8B
Interceptor Oriente



Foto 15: Tramo L8B-L12
Interceptor Oriente



Foto 16: Tramo L12-L11
Interceptor Central



Daño tipo 3: Daño menor a 1/3 de la sección del diámetro de la clave.
Requiere limpieza del acero expuesto y recubrimiento en el revestimiento definitivo



Foto 17: Tramo L13-L0B
 Interceptor Central



Foto 18: Tramo L11-L13
 Interceptor Central



Foto 19: Tramo L8B-L12
 Interceptor Central

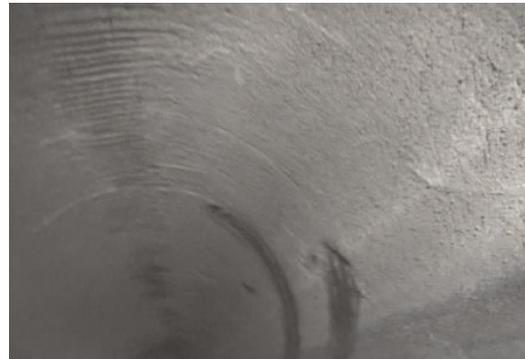
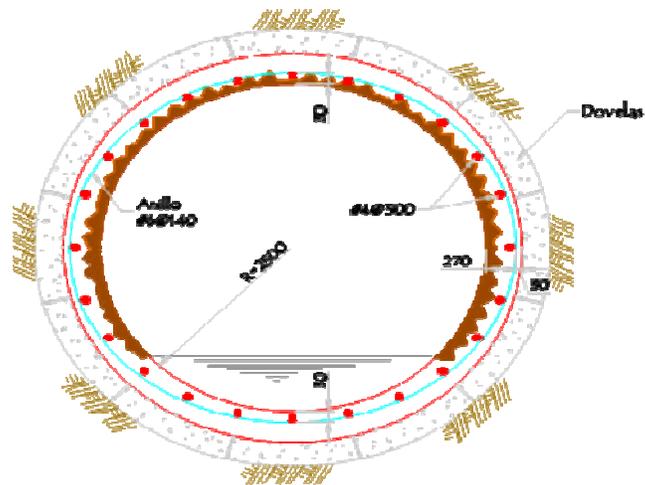


Foto 20: Tramo L12-L13
 Interceptor Central

Tipo de daños en el Drenaje Profundo

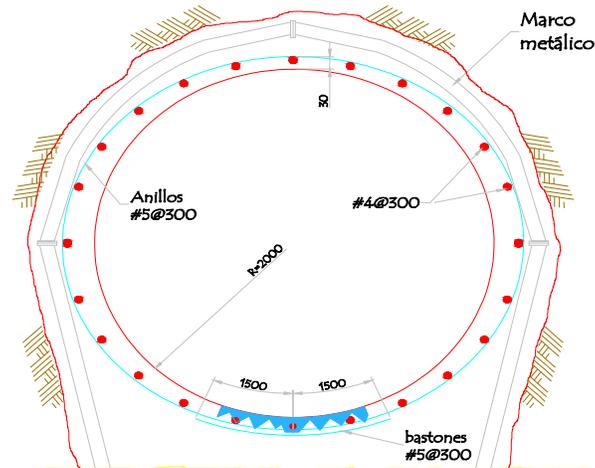


Daño tipo 4: Daño perimetral en el concreto, con gravas expuestas sin cementaje. Requiere recubrimiento de los agregados del revestimiento



Foto 21: Tramo L-11
Interceptor Central

Tipo de daños en el Drenaje Profundo



Daño tipo 5: Daño en la cubeta con degradación en el concreto y acero expuesto. Requiere sustitución de acero y colado con concreto resistente a la abrasión.
Sección Interceptor Centro Poniente



Foto 22: Tramo L-4 a L-5
Interceptor Centro-Poniente

CAPÍTULO 4

“MANTENIMIENTO (REVESTIMIENTO) DEL DRENAJE PROFUNDO LUMBRERA L-8A”

MANTENIMIENTO PREVENTIVO

El mantenimiento preventivo es el destinado a la conservación de equipos o instalaciones mediante realización de revisión y reparación que garanticen su buen funcionamiento y fiabilidad. El mantenimiento preventivo se realiza en equipos en condiciones de funcionamiento.

Entre 5 y 21 de Noviembre de 2008 se inicia, la que fue denominada la Primer Etapa de Mantenimiento del Drenaje Profundo en la Lumbrera 8a, la cual consistió en realizar levantamiento de instalaciones y equipos ubicados en superficie de la lumbrera para su desmantelamiento y poder ser llevados a eje 3 norte casi esq. av. gran canal en donde se ubican almacenes y la unidad de generación del SACM.



Foto 23: Estructuras encontradas en superficie



Foto 24: Desmantelamiento de instalaciones



Foto 25: Desmantelamiento de Instalaciones

Del 22 al 30 de noviembre, la Contratista Cotrisa, inicia con el suministro de materiales, mano de obra y equipo para adecuar las instalaciones provisionales en superficie de lumbrera 8a, para los trabajos de rehabilitación del túnel. También se inician los descensos de personal para los trabajos de la colocación de plataforma para las inspecciones técnicas del **SACM** y del **Instituto de Ingeniería de la UNAM** y la **Supervisión Externa CONIISA**, las cuales tuvieron que ser con mascarillas y equipo de detección de gases, ya que aun se encontraban en niveles por encima de lo permisible y esto también alentaba las actividades.

Se fueron determinando los daños del túnel, presentando este un desgaste total en la zona de la clave y en los costados del túnel principalmente:

1. Acero expuesto con un alto grado de corrosión del 100% en zona de los costados del túnel, con respecto a la clave en túnel no existe acero debido a la abrasión y corrosión de las aguas negras, la cubeta presenta deterioro, desgaste en concreto, pero todavía el acero se encuentra con recubrimiento mínimo de concreto.
2. Filtraciones mínimas (lagrimeos) en costados de túnel.
3. Basura en clave, y en costados de túnel.
4. Niveles de gases: H_2S de entre 0 y 20 ppm, O_2 de entre 19 y 21%.
5. Tirante de aguas negras de entre 50 a 65 cm. provenientes de la lumbrera 7 Interceptor Oriente y del Gran Canal (Obra de Toma).
6. Dezasolve de materiales residuales, así como demoliciones de tapones de concreto.



Foto 26: Ensamble de Tubería Para Ventilación



Foto 27: Retiro de Tapa en Lumbrera



Foto 28: Descenso de Personal



Foto 29: Panorámica del Túnel



Foto 30: Tramo L-8a a L-8b
Inspección al Túnel



Foto 31: Desazolves y Demolición
de tapones de concreto

Del 06 al 10 de Diciembre de 2008, continuo la empresa **Cotrisa** suministrando equipos, se realizan levantamientos topograficos, se aplican productos para unir concreto viejo con concreto nuevo, en pruebas de adherencia (basf, comex, fester, ivrese, sika, sylpyl) y se aplica concreto lanzado sobre estos productos, se calibra elevador alimak. se continúa el monitoreo de los gases.



Foto 32: Elevador Alimak



Foto 33: Aplicación de productos
Para la adherencia de concreto
Nuevo con viejo



Foto 34: Monitoreo de Gases

Del 11 al 15 de Diciembre de 2008, se aplico concreto lanzado en adhesivos de concreto con nuevo (basf, comex, fester, ivrese, sika, sylpyl). Se realizan desazolves y extracción de materiales, se coloca costaleras para secados en túnel.



Foto 35: Concreto lanzado



Foto 36: Retiro de desazolves y Materiales



Foto 37: Suministro de costaleras

Del 16 al 20 de Diciembre de 2008, continuaron los desazolves y extracción de los materiales, también se inicio el montaje de las instalaciones electricas en el túnel, llegan las primeras toneladas de acero de refuerzo para el revestimiento definitivo.



Foto 38: Cargador Frontal utilizado Utilizado para retiro de material



Foto 39: Instalaciones Eléctricas



Foto 40: Primeras toneladas de acero

TRABAJOS PREVIOS A LA REPARACIÓN DEL TÚNEL

Con base a la inspección realizada por el supervisor interno del SACM, supervisión y la contratista en el interior del túnel en el tramo de la lumbrera 8a a la lumbrera 8b, solo se localizaron filtraciones mínimas (lagrimeos) los cuales fueron atacados por medio de calafateo. Sin la necesidad de realizar inyecciones en dichas zonas.

Con base a estas soluciones conciliadas con el SACM, se corrigieron y se solucionó la problemática para poder realizar el revestimiento definitivo, de acuerdo a dictamen técnico emitido por el SACM el día 06 de enero de 2009, indicando el cambio de procedimiento constructivo.



Foto 41: Filtración



Foto 42: Filtración



Foto 43: Filtración

Del 21 al 25 de Diciembre de 2008, continúa el desazolve y la demolición de tapones de concreto en el interior del túnel así como el retiro de los materiales, se realiza recorrido del personal técnico del instituto de **Ingeniería** de la **UNAM**, así como del personal técnico y directivo del **SACM**, se determina el cambio de procedimiento constructivo a base de cimbra telescópica en vez de concreto lanzado. Se inician los trabajos de hidroescarificado en el interior del túnel.



Foto 44: Sistema de Ventilación
Utilizado para retiro de material



Foto 45: Visita Técnica

MANTENIMIENTO CORRECTIVO

Se denomina mantenimiento correctivo, a aquel que corrige los defectos observados en los equipamientos o instalaciones, es la forma más básica de mantenimiento y consiste en localizar averías o defectos y corregirlos o repararlos.

Históricamente es el primer concepto de mantenimiento que se planteó, y el único hasta la primera guerra mundial, dada la simplicidad de las máquinas, equipamientos e instalaciones de la época, mantenimiento era sinónimo de reparar aquello que estaba averiado. Posteriormente se planteó que el mantenimiento no solo tenía que corregir las averías, sino que tenía que adelantarse a ellas garantizando el correcto funcionamiento de las máquinas.

PRUEBAS DE LIMPIEZA

Del 01 al 05 de Diciembre de 2008, se realizan las primeras pruebas de hidroescarificado a la que asistieron directivos del SACM, Constructoras y Supervisoras, para verificar dicho proceso de limpieza del túnel.

Los resultados obtenidos son a 10,000 lbs se obtuvo un ph3, a 20,000 lbs fue un ph5 y a las 30,000 lbs se obtuvo un ph7 (neutro), se realizan recorridos por parte del instituto de Ingenieria de la UNAM, así como extracción de corazones para pruebas solicitadas.



Foto 46: Visita para Prueba de hidroescarificado



Foto 47: Equipo de Hidroescarificado



Foto 48: Hidrolavado en muro de Lumbra 8a, 10,000 psi



Foto 49: Hidroescarificado en muro de lumbra 8a de 20,000a 25,000 psi



Foto 50: 1ra prueba de limpieza con hidrolavado a una presión de 10,000 psi en muro de túnel a 7.00 m de distancia de la lumbra 8ª



Foto 51: Resultado de la 1er prueba dando resultado de ph3 a ph4



Foto 52: 2da prueba de escarificado con hidrolavado a una presión de 20,000 psi en muro de túnel a 7.00 m de distancia de la lumbrera 8ª



Foto 53: Resultado de la 2da prueba dando ph6



Foto 54: 3ra prueba de escarificado con hidrolavado a una presión de 28,000 psi en muro de túnel a 7.00 m de distancia de la lumbrera 8ª



Foto 55: Resultado de la 2da prueba ph6



Foto 56: Resultado de la 3ra prueba a 28,000 psi, dejando el acero libre de oxido

HIDRODEMOLICIÓN

Tecnología desarrollada con el objeto de demoler, escarificar y extraer el concreto dañado de estructuras delicadas como: Puentes, Túneles, Muelles; Además de la preparación y acondicionamiento de las superficies en estructuras dañadas.

Ventajas

- No genera microgrietas
- Retira sólo el concreto dañado
- No daña el armado y retira el óxido del mismo
- Escarifica
- Corta
- Desbasta
- Puede ser selectivo
- Menos agresivo al medio ambiente

MAQUINARIA

- **ESCARIFICACIÓN:** Con el Sistema a Máxima alta presión marca Woma Modelo 150-Z P-19, para una presión de 12,000 a 25,000 psi con un gasto de agua de 37lts/min. accionada con un motor de 150 HP.
- **LAVADO HIDRODINAMICO A TÚNEL:** Con sistema de Máximo Flujo a alta Presión marca Woma Modelo 225-Z para una presión de 4,00 psi y un gasto de 200lts/min.

ACCESORIOS

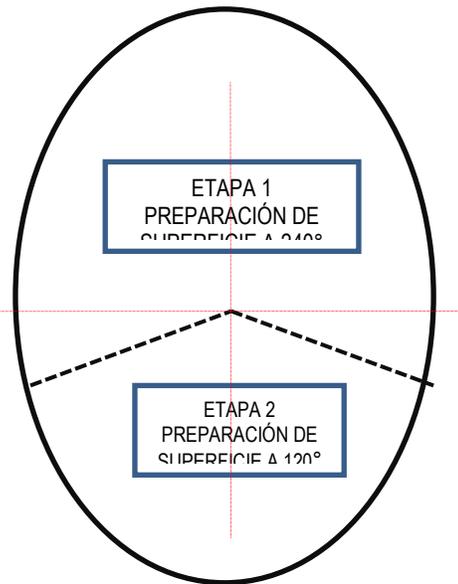
- Disparadores manuales para 30,000 psi.
- Boquillas especiales para 30,000 psi. con incrustaciones de zafiro.
- Sistemas de portatoberas rotativas para preparación de superficies (escarificación, demolición o desbaste).
- Sistema de portatoberas rectas
- Mangueras para alta presión con capacidad de presión de trabajo 30,000psi.y una presión de ruptura de 60,000psi.

HIDROESCARIFICADO

Hidroescarificado, es una técnica que emplea agua a grandes presiones, la cual sirvió para retirar 5 cm de concreto dañado por los gases dentro del túnel, mismo que nos permitió obtener un PH de 7, lo que facilitó la adherencia del concreto nuevo al viejo.



Foto 57: Inicio de Hidroescarificado



SECCIONES DE PREPARACIÓN DE SUPERFICIE

LA PREPARACIÓN DE LA SUPERFICIE SE REALIZÓ EN DOS ETAPAS

1RA ETAPA A 240° DE ACUERDO A RECORRIDO EN CONJUNTO CON EL SACM SE DICTAMINO QUE EL TÚNEL PRESENTABA EL MAYOR DAÑO.

- FECHA DE INICIO 22 DE DICIEMBRE DE 2008
- FECHA DE CONCLUSIÓN 25 DE MARZO DE 2009
- LONGITUD TOTAL 1,309.00 m
- pH OBTENIDO 7 (NEUTRO)
- DIAS LABORADOS 94.00 DIAS, 2 TURNOS DE 12 HRS C/U.

2DA ETAPA 120° DE ACUERDO A DICTÁMEN TÉCNICO EMITIDO EL 6 DE ENERO POR CAMBIO DE PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO A REVESTIMIENTO A 360°

- FECHA DE INICIO 07 DE ENERO DE 2009
- FECHA DE CONCLUSIÓN 27 DE MARZO DE 2009
- LONGITUD TOTAL 1,309.00 m
- pH OBTENIDO 7 (NEUTRO)
- DIAS LABORADOS 80.00 DIAS, 1 TURNO DE 12 HRS C/U.

DATOS GENERALES PARA AMBAS ETAPAS

- VALORES DE pH REGISTRADOS ANTES DE LA PREPARACIÓN DE SUPERFICIE (3, 5, 6 Y 7)
- VALORES DE pH DESPUES DE LA PREPARACIÓN A CHORRO DE AGUA A ALTA PRESIÓN (28,000 A 30,000 LBS. (7)
- DURACION TOTAL DE DÍAS 92.00 DIAS CON 2 TURNOS
- PRECIO UNITARIO: DE CATALOGO

PREPARACIÓN DE SUPERFICIE

TABLA DE VALORES REPRESENTATIVOS EN LA PREPARACIÓN DE SUPERFICIE DE SECCIÓN A 90°

FUERZA DE TRABAJO	MAQUINARIA	MATERIALES	RENDIMIENTO	AVANCE TOTAL
1 PISTOLERO 2 AYUDANTE	HIDROLAVADORAS CLAYTON: MOD. ZHAPYR PROFY DS 2960 T	1.00 JGO DE MANGUERA 1° Ø DE 40.00 ANDAMIOS TUBULARES TABLONES AGUA POTABLE	POR TURNO 85.74 m2	6,859.160 m2

TABLA DE VALORES REPRESENTATIVOS EN LA PREPARACIÓN DE SUPERFICIE DE SECCIÓN A 240°

FUERZA DE TRABAJO	MAQUINARIA	MATERIALES	RENDIMIENTO	AVANCE TOTAL
2 PISTOLEROS 4 AYUDANTES	2.00 HIDROLAVADORAS (WOMA) MOD. P-19 DE 25,000 A 30,000 LBS	2.00 JGOS DE MANGUERA 1° Ø DE 40.00 C/U. ANDAMIOS TUBULARES TABLONES	POR TURNO 74.67 m2 <u>74.67 m2</u> TOTAL DIA	14,039.025 m2

TIEMPO TOTAL	pH (NEUTRO)	PRESIÓN	AVANCE
188.00	7	28,000 A 30,000	1,309.00

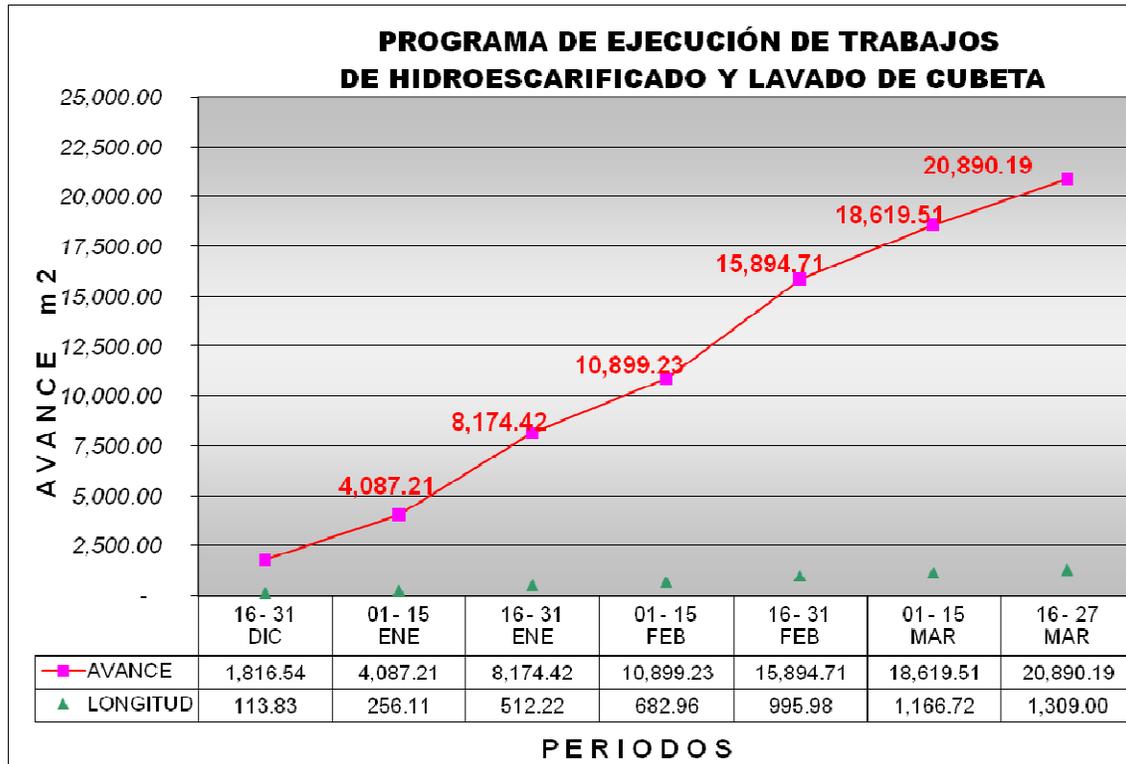
TIEMPO TOTAL	pH (NEUTRO)	PRESIÓN	AVANCE
80.00	7	7,000	1,309.00

TABLA DE VALORES REPRESENTATIVOS EN LA PREPARACIÓN DE SUPERFICIE (RESUMEN)

FUERZA DE TRABAJO	MAQUINARIA	MATERIALES	RENDIMIENTO NTO (m ² /JOR)	AVANCE TOTAL (m ²)
2 PISTOLEROS 4 AYUDANTES	2.00 HIDROLAVADORAS (WOMA) MOD. P-19 DE 25,000 A 30,000 LBS	2.00 JGOS DE MANGUERA 1° Ø DE 40.00 C/U. ANDAMIOS TUBULARES TABLONES AGUA POTABLE	TOTAL DIA 149.35 M2	14,039.025 m2
1 PISTOLERO 2 AYUDANTE	HIDROLAVADORAS CLAYTON: MOD. GOLDEN PLUS 2960 T MOD. ZHAPYR PROFY DS 2960 T	1.00 JGO DE MANGUERA 1° Ø DE 40.00 ANDAMIOS TUBULARES TABLONES AGUA POTABLE	TOTAL DIA 85.74 M2	6,859.160 m2

TIEMPO TOTAL EMPLEADO (JOR)	pH (NEUTRO)	PRESIÓN PROMEDIO (PSI)	AVANCE EJECUTADO (m)
188.00	7	28,000 A 30,000 7,000	1,309.00

TABLA DE VALORES REPRESENTATIVOS EN LA PREPARACIÓN DE SUPERFICIE DE SECCIÓN A 240°



GRÁFICA	PERIODO	AVANCE	LONGITUD
	16- 31 DIC	1,816.54	113.83
	01- 15 ENE	4,087.21	256.11
	16- 31 ENE	8,174.42	512.22
	01- 15 FEB	10,899.23	682.96
	16- 31 FEB	15,894.71	995.98
	01- 15 MAR	18,619.51	1,166.72
	16- 27 MAR	20,890.19	1,309.00

Del 26 al 31 de Diciembre de 2008, continúa el desazolve y la demolición de tapones de concreto en el interior del túnel así como el retiro de los materiales, se continúan los trabajos de hidroescarificado en el interior del túnel con tomas de ph7 (neutro), se inicia el recubrimiento del acero existente a base de producto para protegerlo del oxido.



Foto 58: Hidroescarificado



Foto 59: Toma de Ph



Foto 60: Recubrimiento de Acero

Del 1 al 5 de Enero de 2009, continúan los trabajos de hidroescarificado en el interior del túnel con tomas de ph7 (neutro), se continúa con la aplicación de antioxidante en acero existente, se inicia la distribución de anclas de acuerdo a boletín emitido por el Instituto de Ingeniería de la **UNAM**. El **SACM** indica realizar hidrodemolición en acero existente para el trasape del acero de restitución.



Foto 61: Hidroescarificado



Foto 62: Manómetro de máquina de hidroescarificado



Foto 63: Escarificado en tablas de túnel

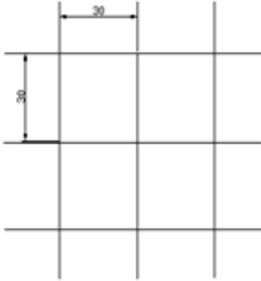


Foto 64 y 65: Recubrimiento con anticorrosivo en acero existente en túnel

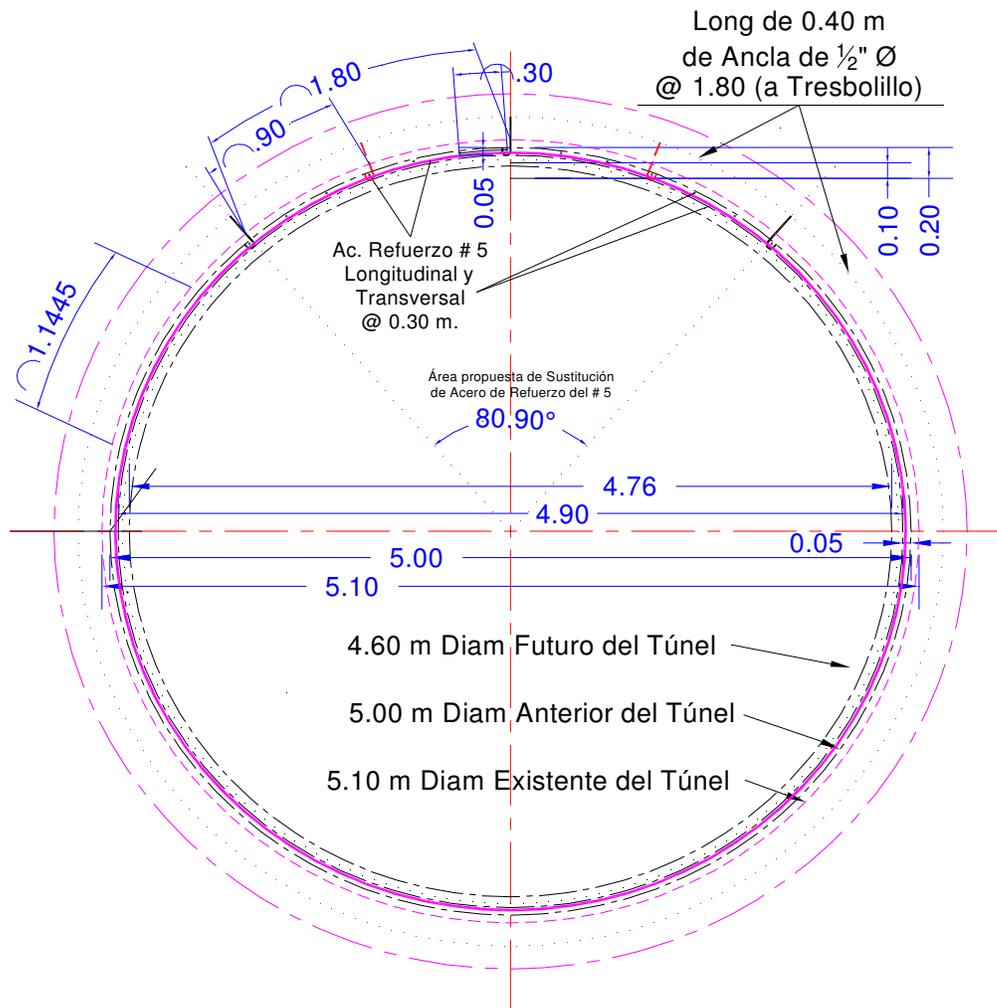
SUMINISTRO, HABILITADO Y COLOCACIÓN DE ACERO DE REFUERZO

Suministro y habilitado de acero no. 5 para revestimiento a cada 30 cm, con anclas de 1/2" a cada 1.20m, con un $f_y=4200\text{kg/cm}^2$,

armado @ 30cm en
ambos sentidos



ACERO DE REFUERZO.



Esquema 5: Acero de refuerzo en túnel

TABLA DE VALORES REPRESENTATIVOS EN LA COLOCACIÓN DE ACERO DE REFUERZO

FUERZA DE TRABAJO	MAQUINARIA Y HERRAMIENTA	MATERIALES	PESO TOTAL DE ACERO COLOCADO (Kg)	AVANCE TOTAL (m)
1 AUX.TÉCNICO 1 SOBRESTANTE 1 CABO 1 OP. DE GRÚA 1 OP. MAQ. 2 MANIOBRISTAS 26 FIERREROS	GRUA 45 TON. CARGADOR FRONTAL. ANDAMIO TUBULAR HERR. MENOR	ACERO DE REFUERZO 5/8" ALAMBRE RECOCIDO ANCLAJE. 1/2 " SILLETAS 3/8" RESINA EPÓXICA (EPOXSEAL)	205,203.03	1299.00

Del 06 al 10 de Enero de 2009, continúan los trabajos de hidroescarificado en el interior del túnel, se realizan muestras de pH7 (neutro) para dar continuidad a los trabajos, se realiza la aplicación de antioxidante en acero existente, continúa la colocación de anclas. Se realiza recorrido por parte del Instituto de Ingeniería de la UNAM y personal directivo del SACM solicitando realizar pruebas de adherencia en concreto lanzado; Dichas pruebas fueron realizadas por personal técnico del Instituto de la UNAM, así mismo se cancela la restitución de acero en zonas dañadas. Se inician bases para la colocación de planta de concreto en obra. Por evaluación del Instituto de Ingeniería de la UNAM y del SACM, se cambia el procedimiento constructivo de concreto lanzado a revestimiento a 360° con cimbra telescópica con un diámetro de 4.6 m, con un recubrimiento de 10 cm y concreto f'c=350 kg/cm² puzolanico, resistente a los gases.



Foto 66: Escarificado en tablas de túnel

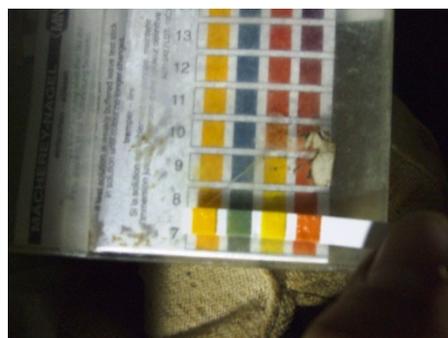


Foto 67: Toma de PH

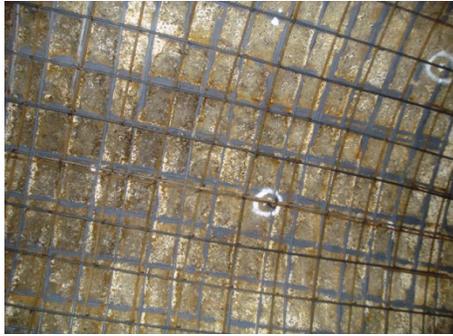


Foto 68: Antioxidante en acero expuesto



Foto 69: Recorrido, UNAM y SACM



Foto 70: Pruebas de adherencia del concreto



Foto 71: Base para planta de concreto

Del 11 al 15 de Enero de 2009. Continúa hidroescarificado, muestras de pH7 (neutro), aplicación de antioxidante en acero existente, colocación de anclas y el acero de restitución de en zonas dañadas. Se realizan levantamientos topográficos para el cálculo de volumetrias. Se continúa con el descenso y acarreo en el interior del túnel de acero de refuerzo.



Foto 72: Escarificado en Túnel



Foto 73: Levantamiento Topográfico



Foto 74: Acarreo de Varilla

Del 16 al 20 de Enero de 2009. Continúan con el hidroescarificado, aplicación de antioxidante, redistribución y colocación de anclas. Se inicia la colocación de acero de refuerzo definitivo a 360° con un diámetro de 4.80 m, para un concreto terminado de 4.60 m. para este procedimiento se realiza lavado de cubeta a una presión de 10,000 lbs hasta obtener un ph7 (neutro). Se realizó extracción de corazones para adherencia de concreto viejo con nuevo por parte del IMCYC.



Foto 75: Escarificado en Túnel



Foto 76: Aplicación de antioxidante



Foto 77: Lavado de Cubeta



Foto 78: Extracción de Corazones



Foto 79: Extracción de Corazones



Foto 80: Armado de Acero a 360°



Foto 81: Escarificado en Clave



Foto 82: Aplicación de Resina para Anclas

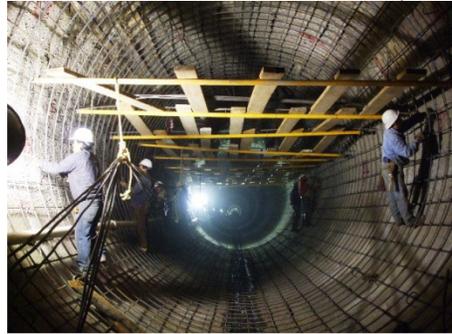


Foto 83: Armado de acero a 360°

CIMBRA

Del 21 al 25 de Enero de 2009. Comienza a llegar a obra cimbra telescópica (cubeta y jumbo) y se realiza en túnel el descenso y ensamble de la cimbra, durando 3 días el armado de los primeros 3 módulos de cimbra, con una longitud de 6 metros por módulo,



Foto 84: Descenso de Jumbo al túnel



Foto 85: Jumbo armado



Foto 86: Ensamble de Cimbra Telescópica

Del 01 al 15 de Mayo, se inició la rehabilitación de la cimbra metálica telescópica en la lumbrera 1, a base de Sand-Blast a metal negro por la cara interior de la cimbra y por el exterior se limpio a base de carda de cerda metálica, para su posterior aplicación de recubrimiento primario y de acabado final en el el interior, así como de primario en el exterior.



Foto 87 y 88: Desmantelamiento de Cimbra en Túnel



Foto 89 y 90: Retiro de Cimbra del Túnel



Foto 91 y 92: Retiro de Jumbo del Túnel



Foto 93: Limpieza en cara exterior



Foto 94: Limpieza en cara interior



Foto 95: Plantilla para colocación de Cimbra



Foto 96: Limpieza en cara exterior



Foto 97: limpieza mediante Sand- Blasteo



Foto 98: ensamble de cimbra



Foto 99: Mantenimiento final a la cimbra



Foto 100: Termino del mantenimiento

Del 26 al 31 de enero de 2009. Continúa hidroescarificado, aplicación de antioxidante, colocación de anclas, acero de refuerzo definitivo, secado y lavado de cubeta, ensamble de cimbra telescópica, se realiza el primer colado de revestimiento definitivo a 360°, y se realiza el colado de los primeros 18.00 metros lineales. El concreto utilizado, fue suministrado por la Concretera LACOSA (60 m3).



Foto 101: Escarificado en Túnel



Foto 102: Habilitado y Armado de Acero



Foto 103: Secado y Lavado de cubeta



Foto 104: Suministro de Concreto



Foto 105: Colado en Túnel



Foto 106: Control de Calidad

Del 01 al 15 de Febrero de 2009. Continúa hidroescarificado, aplicación de antioxidante, colocación de anclas, acero de refuerzo definitivo, secado y lavado de cubeta, ensamble de cimbra telescópica y aplicación de desmoldante, se continúan los colados a 360°, así como limpieza de cimbra. Se aplica curacreto al desmontar cimbra. en las filtraciones (lagrimeo) del túnel, solo se realizaron calafateos con taladro neumático y no hubo necesidad de aplicar producto de sellado alguno.



Foto 107: Escarificado



Foto 108: Aplicación de Antioxidante



Foto 109: Colocación de Anclas



Foto 110: Habilitado y Armado de acero 360°



Foto 111: Lavado de Cubeta



Foto 112: Lacado de Cubeta



Foto 113: Colocación de tapón en extremo de cimbra



Foto 114: Colado



Foto 115: Desensamble de tubería para colado



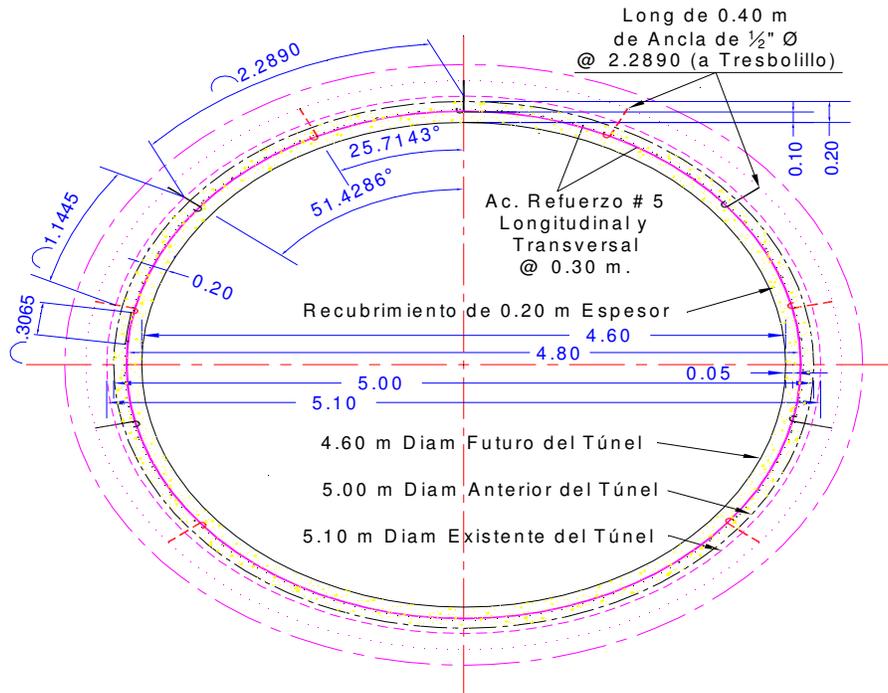
Foto 116: Movimiento de Cimbra



Foto 117: Aplicación de Cura

CONCRETO PARA REVESTIMIENTO DEFINITIVO

Para el revestimiento definitivo se utilizó concreto hecho en obra bombeable autocompactable, $f'c=350$ kg/cm² resistente a los sulfatos y a la abrasión con agregado basáltico.



Los aspectos más relevantes durante la ejecución de este trabajo fueron:

1. Fecha de inicio : 27-ene-09
2. Fecha de conclusión: 01-abril-09
3. Longitud revestida= 1299 m.
4. Volumen : 5388.98 m³
5. Se utilizó concreto lanzado $f'c = 250$ kg/cm² para la unión del tramo de la lumbrera 8c-8a

CONCRETO PARA REVESTIMIENTO

TABLA DE VALORES REPRESENTATIVOS PARA EL DESARROLLO

FUERZA DE TRABAJO	MAQUINARIA O EQUIPO	MATERIALES	RENDIMIENTO	AVANCE TOTAL
1 AUX. TECNICO 1 JEFE DE FRENTES 1 SOBRESTANTE 1 CABO 1 OP. DE DRAGA 1 OP. DE JUMBO 1 OP. DE BOMBA 1 MEÁCANICO 1 ELÉCTRICO 1 SOLDADOR 2 LABORATORISTAS 8 MANIOBRISTAS	1 DRAGA 1 BOMBA PARA CONCRETO DE ALTO ALCANCE. 1 PLSNTS PARA CONCRETO 1 GUILLOTINA PARA PASO DE CONCRETO 10 VIBRADORES NEUMÁTICOS DE PARED TUBERÍA DE 6" PARA AIRE COMPRIMIDO TUBERÍA DE 5" PARA CONCRETO	CONCRETO PREMEZCLADO $f_c=350$ kg/cm ² RESISTENTE A LOS SULFATOS	61.16	5388.98
TIEMPO TOTAL EMPLEADO (JOR)		CONTROL DE CALIDAD. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN A 28 DÍAS. PROMEDIO		
46.85		430		



Foto 118: Bomba Para Concreto Putzmeister



Foto 119: Concreto Hecho en Obra



Foto 120: Vibrador Neumático de Pared



Foto 121: Inyección de Concreto en Clave



Foto 122: Limpieza Durante Colado



Foto 123: Limpieza Después del Colado



Foto 124: Colocación de Concreto en Bomba de alto alcance



Foto 125: Inyección de Concreto en Ventanilla lateral de cimbra



Foto 126: Cimbrado



Foto 127: Aplicación de Desmóldate En Cimbra



Foto 128: Aplicación de Curaseal

El concreto está compuesto principalmente de cemento, agregados y agua. Contiene también alguna cantidad de aire atrapado y puede contener además aire incluido intencionalmente mediante el uso de un aditivo o de un cemento inclusor. Con frecuencia los aditivos se pueden utilizar, acelerar, retardar o mejorar la trabajabilidad, para reducir los requerimientos de agua de mezclado, para mejorar la resistencia o las propiedades del cemento.

Las características requeridas están determinadas por el uso al que estará destinado el concreto y por las condiciones esperadas en el momento de la colocación.

La habilidad para conformar las propiedades del concreto, a las necesidades de la obra, es un reflejo del desarrollo tecnológico que parte de inicio de 1900.

El concreto autocompactable es un concreto muy fluido y sin embargo muy estable, puede fluir de manera muy rápida y llenar las cimbras sin experimentar compactación y sin segregación significativa, El autocompactable es un concreto “hipersensible”. Pequeños cambios en la mezcla, sobre todo en la cantidad de agua, pueden tener muy grandes repercusiones. Por eso, el concreto autocompactable normalmente se vende como un producto de desempeño con valor agregado.

Los tres componentes principales del autocompactable incluyen una mezcla de concreto apropiadamente proporcionada, diseñada para la aplicación, un reductor de agua sintético de alto rango o superfluidificador, y a veces un aditivo modificador de la viscosidad. Las cantidades de cada componente pueden variar para el logro de un amplio rango de resultados.

Los superfluidificadores proporcionan la alta fluidez del concreto autocompactable. Aunque los reductores de agua de alto rango han estado en el mercado por másde 30 años.

Los reductores de agua sintéticos de alto rango están concebidos técnicamente en el nivel molecular para proporcionar las propiedades deseables, en tanto minimizan las propiedades indeseables. Los superfluidificadores basados en policarboxilato son poderosos dispersadores de cemento que requieren menos agua de mezclado, al tiempo que incrementan de manera significativa las características de fluidez.

Las generaciones anteriores de superfluidificadores retardaban el fraguado inicial, pero algunos de policarboxilato están técnicamente concebidos para un fraguado inicial más rápido. También, proporcionan mejor y más completa hidratación de las partículas de cemento, produciendo características incrementadas de fraguado “muy temprano” (4 a 6 horas).

CONSIDERACIONES EN EL DISEÑO DE LA MEZCLA

Las granulometrías de los agregados desempeñan un papel muy importante en el proporcionamiento de las mezclas para el concreto autocompactable. Los agregados bien graduados -incluyendo agregados finos con buena graduación- hacen el mejor concreto autocompactable, pues requieren menos material cementante y menos agua de mezclado y, por tanto, causan menos problemas de contracción, ondulado y eflorescencia. En el contenido cementante para una mezcla bien graduada, de 20% a 25% puede ser ceniza volante que debe incluirse, pues aumenta la fluidez.

Sin embargo, en muchos lugares del país no tienen ni el equipo ni el agregado para producir mezclas con agregados bien graduados. Pero, inclusive cuando sólo hay disponibles agregados de granulometría escalonada, todavía puede producirse concreto autocompactable. Una mezcla que contenga agregado con granulometría escalonada presentará una tendencia a sangrar o a segregarse, o ambas cosas, pero esto puede corregirse incrementando el contenido cementante -incluyendo puzolanas- y utilizando un modificador de viscosidad para controlar la segregación y el sangrado para facilitar la colocación.

ADITIVOS QUE MODIFICAN LA VISCOSIDAD

Son esencialmente “espesadores”. Al agregar un modificador de viscosidad se puede trabajar una mezcla de concreto, que de otra manera sería aguada, y hacer que fluya como miel. La mayoría de los modificadores de viscosidad están compuestos por materiales de polímero con base en celulosa y tiene un efecto neutro en las propiedades del concreto, excepto la viscosidad. Los modificadores de viscosidad que absorben el agua rápidamente y la retienen, son más populares para controlar el sangrado y para usarse en secciones profundas, como en muros y columnas, en donde el potencial de que haya segregación resulta más grande.

Cuando se usa una mezcla con alto contenido de finos -más material cementante y una proporción de arena superior a la normal- para desarrollar la estabilidad de una mezcla de concreto autocompactable, crece la demanda de agua, lo cual da como resultado un incremento en la contracción por secado y en la fluencia del concreto endurecido. Es preferible el uso de un modificador de viscosidad para proporcionar estabilidad al concreto autocompactable, pues no se ven afectadas la contracción por secado, ni la fluencia. En resumen, los modificadores de viscosidad evitan que las mezclas fluidas se segreguen y son especialmente útiles para mezclas de granulometría escalonada cuando hay que incrementar el cemento y otros finos, o cuando se usa arena manufacturada o un agregado inconsistente.

Los beneficios de los concretos autocompactables incluyen, sobre todo, su trabajabilidad en el estado plástico, más que el mejoramiento de las propiedades en el estado endurecido. Por lo tanto, las pruebas más importantes son aquéllas que definen su consistencia y fluidez, o sea, la reología de la mezcla. Puesto que

no hay pruebas estandarizadas para concreto autocompactable, se han usado un cierto número de métodos. Las pruebas sugeridas para definir las características de una mezcla de autocompactable son:

- **Fluidez.** Más que medir el asentamiento vertical –revenimiento- tal como lo hacemos con el concreto normal, con el concreto autocompactable medimos el flujo del revenimiento horizontal. El autocompactable puede ser producido de modo que tenga una dimensión de flujo del revenimiento de entre 50 y 76 cm, dependiendo del requisito de la obra.
- **Tasa de flujo.** La prueba T 50 mide cuánto tiempo tarda un concreto autocompactable en alcanzar un radio del flujo de revenimiento de 50 cm.
- **Capacidad para fluir en un espacio confinado.** Es una de las características definitorias del concreto autocompactable. La prueba de Caja L puede usarse para medir esta propiedad, permitiendo que el concreto fluya a través de una caja en forma de L, con varias rejillas de varillas de refuerzo para inhibir el flujo de concreto.
- **Estabilidad.** La capacidad para resistir la segregación –la estabilidad de la mezcla– es una de las cualidades más importantes del concreto autocompactable. La estabilidad típicamente se “mide” usando el índice visual de estabilidad, una clasificación visual desde cero hasta tres en incrementos de 0.5.

VENTAJAS DEL CONCRETO AUTOCOMPACTABLE

- Incrementa su capacidad para colar concreto en lugares de difícil acceso y con refuerzo muy congestionado.
- Completa sus obras más temprano e incrementa su productividad.
- Reduce la necesidad de reparaciones y nuevos trabajos.
- Puesto que el concreto es autocompactable, no hay necesidad de vibración.
- Minimiza los esfuerzos de trabajo/mano de obra; permanece fresco por más tiempo y reduce errores de los operarios.
- Disminuye el ruido en el trabajo y cuida los oídos de sus trabajadores.
- Utiliza sus recursos de mano de obra con mayor eficiencia.

- Incrementa la seguridad y crea un ambiente de trabajo más placentero, con un menor potencial de accidentes.
- Es ideal para todos los casos de aplicación que quedarán “tal como son colados”, en donde las especificaciones recomiendan superficies lisas, libres de agujeros. Todas las superficies perfiladas con moldes también se benefician del concreto autocompactable.
- Es ideal para la construcción de paneles de tilt up.
- Hace que las grandes aplicaciones en superficies planas sean más fáciles para sus obreros.

El concreto autocompactable cuesta más que las mezclas de concreto estándar. Esta puede ser una razón del porqué los contratistas de concreto tal vez no quieran probarlo. Pero ‘el costo en el lugar de la obra’ en muchos casos será menor, y de este modo deben verse los costos reales.

RECUBRIMIENTO PARA PROTECCIÓN DEL CONCRETO CONTRA ATAQUE DE GASES

T-LOCK

Es una lámina de cloruro de polivinilo especialmente formulado que bloquea mecánicamente en la pared interior de las tuberías de alcantarillado de hormigón, túneles o bocas de inspección durante la fabricación o la rehabilitación, proporcionando una barrera flexible de corrosión que soportar décadas de servicio severo.



Foto 129: Colocación de tubería para Colado



Foto 130: Capacitación del Personal



Foto 131: Descenso del T-lock



Foto 132: Colocación de T-lock



Foto 133: Colocación de T-lock



Foto 134: Colocación de T-lock



Foto 135: Sellado en junta de T-lock



Foto 136: Sellado de T-lock



Foto 137 y 138: Filtración de Concreto entre Cimbra y T-Lock



Foto 139 y 140: Filtración de Concreto entre Cimbra y T-Lock

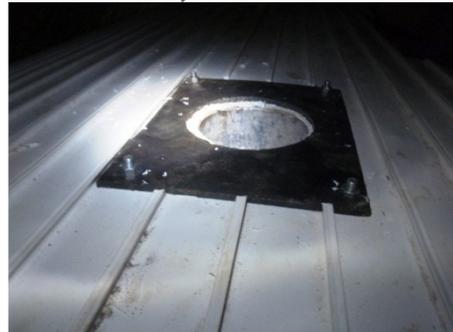


Foto 141 y 142: Placa metálica, utilizada para sujetar T-Lock a Cimbra

Del 16 al 28 de Febrero de 2009, continua el hidroescarificado, aplicación de antioxidante, colocacion de anclas, acero de refuerzo definitivo, secado y lavado de cubeta, desmontaje y montaje de cimbra telescopica, colocación de tubería para concreto y aire comprimido para limpieza de la misma, aplicación de desmoldante, se continúa colando, limpieza de cimbra, aplicación curacreto. Se inicia el descenso, acarreo y colocación de T-LOCK, también se realiza la visita de personal técnico de AMERON (T-LOCK) para capacitar al personal en la termofusión de T-LOCK, además se realizó recorrido de personal tecnico del SACM y del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

También el colado presentó, problemas al filtrarse el concreto entre la cimbra y el T-Lock, solucionando, al colocar una placa, que sujetaba al T-Lock con la Cimbra.

Del 1 al 31 de Marzo, continuaron las actividades dentro del túnel, colocación de acero de refuerzo a 360°, suministro y colocación de anclas, aplicación de antioxidante en acero expuesto por el ataque de gases, lavado de cubeta, colocación de T-Lock y colados, también se tuvo la visita del Jefe de Gobierno de la Ciudad de México, el Lic. Marcelo Ebrad Casaubón, del director de Sistema de Aguas de la Ciudad de México (Ing. Ramón Aguirre), acompañados por reporteros de distintas partes del mundo, y alumnos de la Facultad de Economía de la UNAM, los cuales pudieron observar las diferentes actividades y tecnologías que se venian realizando para darle mantenimiento al Drenaje Profundo.



Foto 143: Colado en Túnel



Foto 144: Movimiento de Cimbra

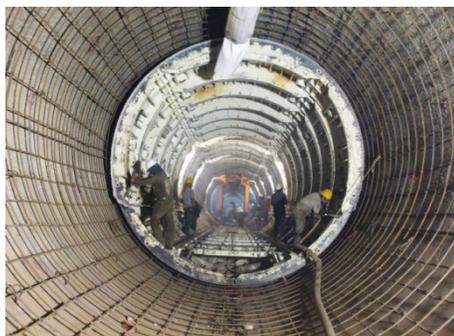


Foto 145: Se fija T-Lock a clave de Cimbra



Foto 146: Colado



Foto 147: Limpieza después de colado



Foto 148: Curado de Concreto



Foto 149: Señado de Juntas de T-Lock



Foto 150: Señado de Juntas de T-Lock



Foto 151: Visita del Ing. Ramón Aguirre



Foto 152: Visita del Ing. Ramón Aguirre



Foto 153: Visita del Lic. Marcelo Ebrad Casaubón



Foto 154: Visita del Lic. Marcelo Ebrad Casaubón



Foto 155: Visita de alumnos de la Fac. de Economía de la UNAM

Del 01 al 15 de Abril de 2009, Se realiza el último colado, alcanzando una longitud total de 1299 ml, se inicia el desmantelamiento, acarreo y retiro de cimbra telescópica, así como se concluye la unión de concreto lanzado y revestimiento. se inicia la aplicación de limpieza y aplicación de producto SYLPYL contra el ataque de los gases en el tramo faltante de T-LOCK y se aplica a 180° por instrucciones del SACM.



Foto 156: Ultimo Colado



Foto 157: Limpieza de Ultimo Colado



Foto 158: Ultimo Colado



Foto 159: Desmantelamiento de Tubería



Foto 160 y 161: Conexión entre los tramos L8b-L8a y L8a-L8c, mediante concreto lanzado





Foto 162 y 163: Conexión entre los tramos L8b-L8a y L8a-L8c, mediante concreto lanzado

Del 16 al 30 de Abril, continuá movimiento de cimbra a la lumbrera I1, donde se le dara el mantenimiento, el cual será de acuerdo a boletín emitido por el SACM, se continuan retirando equipos de la constratista COTRISA, se concluyen los trabajos en tunel y brocal de lumbrera (concreto lanzado y revestimiento) y se aplica recubrimiento contra los gases SYLPYL.



Foto 164: Retiro de Maquinaria de la lumbrera



Foto 165: Retiro de Cimbra a la lumbrera 11



Foto 166y 167: Preparación de superficie para aplicación SYLPYL contra los gases

RECUBRIMIENTO PARA PROTECCION DEL CONCRETO CONTRA ATAQUE DE GASES.

Cabe destacar que una parte muy importante del costo de un sistema de protección contra la corrosión, es el costo de la limpieza y la mano de obra de aplicación por lo que a largo es mucho más económico una vez que diez veces en el mismo período.

Esto además de evitar los paros por mantenimiento que tienen costos incalculables.

Es muy importante mencionar que los productos de nueva generación son ecológicos y de muy bajo impacto ambiental, al ser de muy altos sólidos o 100% sólidos, es decir sin solventes volátiles dañinos y formulados con pigmentos no tóxicos que protegen la naturaleza.

Los epóxicos 100% sólidos SYLPYL 125 y SYLPYL 181 están exentos totalmente de solventes y tienen una muy alta resistencia al desgaste mecánico y muy buena resistencia química.

Existen dos modalidades con derivados de zinc como componente inhibidor de la corrosión para la protección de superficies de acero (SYLPYL 125) y para superficies de concreto (SYLPYL 181).



Foto 168 y 169: Aplicación SYLPYL contra los gases



Foto 170 y 171: Aplicación SYLPYL contra los gases



Foto 172: Pruebas de calidad a recubrimiento SYLPYL contra los gases

CAPÍTULO 5
CONCLUSIONES

Para la rehabilitación del drenaje profundo, se realizó una gran inversión de recursos económicos, ya que sin este mantenimiento, el Sistema de Drenaje Profundo hubiese colapsado. En la zona centro los niveles de aguas negras hubieran alcanzado los 2 metros por arriba de la superficie.

En las zonas altas de la ciudad, entrarían en caos, ya que los mantos acuíferos y la red de distribución de agua potable se hubiesen contaminado, la ciudad quedaría sin agua, lo que hubiera provocado epidemias que cobrarían muchas vidas.

Las fallas que presentaba el Sistema de Drenaje Profundo, es provocado por los asentamientos producto de la extracción de agua de los mantos acuíferos, lo que provocó pendientes negativas, o que derivó que disminuyera la capacidad de desalojo de aguas negras que tenía originalmente el Sistema de Drenaje Profundo de la Ciudad de México.

Para resolver las pendientes negativas existen en el Drenaje Profundo, se optó por la construcción de casas de máquinas, las cuales tienen la función de bombear las aguas negras, para facilitar el desalojo de las mismas.

Para realizar el mantenimiento al Sistema de Drenaje Profundo de la Ciudad de México, se realizó el mantenimiento del Interceptor Oriente, en el cual participaron las empresas contratistas **LOMBARDO** (L-0A a L-13), **ICA** (L-12 a L11), **OEGSA** (L-11 a L8b), **COTRISA** (L-8B a L-8A y L-8A a L-8), con las empresas encargadas de supervisar los trabajos, **LORAFER** (Lombardo) y **CONIISA**.

En el Interceptor Central se rehabilitaron las lumbreras L-0B y L-13, los trabajos corrieron a cargo de la contratista **ESTRELLA** y la empresa supervisora **LORAFER**.

El Estado de México también rehabilitó el Emisor Central, desde la lumbrera L-0 hasta el Portal de Salida (L-21).

Empresas como **VIRGO**, **PENINSULAR** y **MICROTUNEL**, fueron las encargadas de realizar los trabajos de rehabilitación del Sistema de Drenaje Profundo.

La supervisión de los trabajos corrió a cargo de las empresas **SUCOCO** y **LORAFER**.

La rehabilitación del Sistema de Drenaje Profundo de la Ciudad de México, utilizó nuevas tecnologías, como son el concreto autocompactable resistente a los sulfatos, un polímero llamado T-Lock, el cual le da una protección extra al concreto, epóxicos SYLPYL, los cuales se utilizaron en los primeros colados, esto debido a la tardanza en la llegada del T-LOCK, que es de importación, lo que demoró su llegada. Se crearon miles de empleos, la mano de obra directa fue de 1,362 y la indirecta fue de 2,097, el equipo mayor supero las 50 unidades y el menor 72 unidades.

ÍNDICE FOTOGRÁFICO

CAPÍTULO 1 DRENAJE PROFUNDO Y OBRAS COMPLEMENTARIAS

FOTO 1 (Cimbra Revestimiento Definitivo Emisor Central).....	7
FOTO 2 (Construcción Emisor Poniente).....	8
FOTO 3 (Tajo de Nochistongo Actualidad).....	11
FOTO 4 (Cajón Gran Canal).....	14
FOTO 5 (Lumbrea 8A).....	17

CAPÍTULO 2 ANTECEDENTES

CAPÍTULO 3 EVALUACION DEL DRENAJE PROFUNDO (DF)

FOTO 6 (Inspección al Emisor Central).....	70
FOTO 7 (Deterioro en Clave del Drenaje Profundo).....	75
FOTO 8 (Inspección en Cubeta).....	75
FOTO 9 (Unimog).....	76
FOTO 10 (Tramo L13-L0A Interceptor Oriente).....	79
FOTO 11 (Tramo L8B-L8 Interceptor Oriente).....	79
FOTO 12 (Interceptor Oriente).....	79
FOTO 13 (Tramo L8C-L8A Interceptor Oriente).....	80
FOTO 14 (Tramo L8A-L8B Interceptor Oriente).....	80
FOTO 15 (Tramo L8B-L12 Interceptor Oriente).....	80
FOTO 16 (Tramo L12-L11 Interceptor Central).....	80
FOTO 17 (Tramo L13-L0B Interceptor Central).....	81
FOTO 18 (Tramo L11-L-13 Interceptor Central).....	81
FOTO 19 (Tramo L8B-L12 Interceptor Central).....	81
FOTO 20 (Tramo L12-L13 Interceptor Central).....	81
FOTO 21 (Tramo L-11 Interceptor Central).....	82
FOTO 22 (Tramo L4-L5 Interceptor Centro-Poniente).....	83

CAPÍTULO 4 ACCIONES DE MITIGACIÓN PARA MEJORAR LA OPERATIVIDAD DEL DRENAJE PROFUNDO

FOTO 23 (Estructuras Encontradas en Superficie).....	85
FOTO 24 (Desmantelamiento de Instalaciones).....	85
FOTO 25 (Desmantelamiento de Instalaciones).....	85
FOTO 26 (Ensamble de Tubería para Ventilación).....	86
FOTO 27 (Retiro de Tapa en Lumbrera).....	86
FOTO 28 (Descenso de Personal).....	86
FOTO 29 (Panorámica del Túnel).....	86
FOTO 30 (Tramo L8A-L8B Inspección del Túnel).....	87
FOTO 31 (Desazolve y Demolición de Tapones de Concreto).....	87
FOTO 32 (Elevador Alimak).....	87
FOTO 33 (Aplicación de Productos para la Adherencia de Concreto).....	87
FOTO 34 (Monitoreo de Gases).....	87
FOTO 35 (Concreto Lanzado).....	88
FOTO 36 (Retiro de Desazolves y Materiales).....	88
FOTO 37 (suministro de Costaleras).....	88
FOTO 38 (Cargador Frontal Utilizado para Retiro de Material).....	88
FOTO 39 (Instalaciones Electricas).....	88
FOTO 40 (Primeras toneladas de acero).....	88
FOTO 41 (Aportación mínima (Calafateada)).....	89

FOTO 42 (Aportación mínima (Calafateada)).....	89
FOTO 43 (Aportación mínima (Calafateada)).....	89
FOTO 44 (Sistema de Ventilación).....	90
FOTO 45 (Visita Técnica).....	90
FOTO 46 (Visita para Prueba de Hidroescarificado).....	93
FOTO 47 (Equipo de Hidroescarificado).....	93
FOTO 48 (Hidrolavado en Muro de Lumbrera).....	93
FOTO 49 (Hidroescarificado en Muro de Lumbrera).....	93
FOTO 50 (1er Prueba de Limpieza).....	93
FOTO 51 (Resultado de la Prueba de Limpieza).....	93
FOTO 52 (2da Prueba de Limpieza).....	94
FOTO 53 (Resultado de la Prueba de Limpieza).....	94
FOTO 54 (3ra Prueba de Limpieza).....	94
FOTO 55 (Resultado de la 2da Prueba PH 6).....	94
FOTO 56 (Resultado de la Tercer Prueba).....	94
FOTO 57 (Inicio del Hidroescarificado).....	96
FOTO 58 (Hidroescarificado).....	99
FOTO 59 (Toma de PH).....	99
FOTO 60 (Recubrimiento de Acero).....	99
FOTO 61 (Hidroescarificado).....	99
FOTO 62 (Manometro de Máquina de Hidroescarificado).....	99
FOTO 63 (Escarificado en Tablas de Túnel).....	100
FOTO 64 (Recubrimiento Anticorrosivo en Acero Existente).....	100
FOTO 65 (Recubrimiento Anticorrosivo en Acero Existente).....	100
FOTO 66 (Escarificado en Tablas de Túnel).....	102
FOTO 67 (Toma de Ph).....	102
FOTO 68 (Antioxidante en Acero Expuesto).....	103
FOTO 69 (Recorrido, UNAM y SACM).....	103
FOTO 70 (Pruebas de Adherencia).....	103
FOTO 71 (Bases para Planta de Concreto).....	103
FOTO 72 (Escarificado en Túnel).....	103
FOTO 73 (Levantamiento Topográfico).....	103
FOTO 74 (Acarreo de Varilla).....	103
FOTO 75 (Escarificado en Túnel).....	104
FOTO 76 (Aplicación de Antioxidante).....	104
FOTO 77 (Lavado de Cubeta).....	104
FOTO 78 (Extracción de Corazones).....	104
FOTO 79 (Extracción de Corazones).....	104
FOTO 80 (Armado de Acero a 360°).....	104
FOTO 81 (Escarificado en Clave).....	105
FOTO 82 Aplicación de Resina para Anclas).....	105
FOTO 83 (Armado de Acero a 360°).....	105
FOTO 84 (Descenso de Jumbo al Túnel).....	106
FOTO 85 (Jumbo Armado).....	106
FOTO 86 (Ensamble).....	106
FOTO 87 (Desmantelamiento de la Cimbra en Túnel).....	106
FOTO 88 (Desmantelamiento de la Cimbra en Túnel).....	106
FOTO 89 (Retiro de Cimbra en Túnel).....	107
FOTO 90 (Retiro de Cimbra en Túnel).....	107
FOTO 91 (Retiro de Cimbra en Túnel).....	107
FOTO 92 (Retiro de Cimbra en Túnel).....	107
FOTO 93 (Limpieza en Cara Exterior).....	107
FOTO 94 (Limpieza en Cara Interior).....	107
FOTO 95 (plantilla para Colocación de Cimbra).....	107
FOTO 96 (Limpieza en Cara Exterior).....	107
FOTO 97 (Limpieza mediante Sand-Blasteo).....	108

FOTO 98 (Ensamble de Cimbra).....	108
FOTO 99 (Mantenimiento Final de la Cimbra).....	108
FOTO 100 (Termino del Mantenimiento).....	108
FOTO 101 (Escarificado en Túnel).....	108
FOTO 102 (Habilitado y Armado de Acero).....	108
FOTO 103 (Secado y Lavado de Cubeta).....	108
FOTO 104 (Suministro de Concreto).....	108
FOTO 105 (Colado en Túnel).....	109
FOTO 106 (Control de Calidad).....	109
FOTO 107 (Escarificado).....	109
FOTO 108 (Aplicación de Antioxidante).....	109
FOTO 109 (Colocación de Anclas).....	109
FOTO 110 (Habilitado y Armado de Acero 360°).....	109
FOTO 111 (Lavado de Cubeta).....	110
FOTO 112 (Lavado de Cubeta).....	110
FOTO 113 (Colocación de Tapón en Extremo de Cimbra).....	110
FOTO 114 (Colado).....	110
FOTO 115 (Desensamble de Tubería para Colado).....	110
FOTO 116 (Movimiento de Cimbra).....	110
FOTO 117 (Aplicación de Curacreto).....	110
FOTO 118 (Bomba para concreto Putzmeister).....	112
FOTO 119 (Concreto Hecho en Obra).....	112
FOTO 120 (Vibrador Neumático de Pared).....	112
FOTO 121 (Inyección de Concreto en Clave).....	112
FOTO 122 (Limpieza Durante el Colado).....	113
FOTO 123 (Limpieza Después del Colado).....	113
FOTO 124 (Colocación de Concreto con Bomba de Alto Alcance).....	113
FOTO 125 (Inyección de Concreto en Ventanilla Lateral de Cimbra).....	113
FOTO 126 (Cimbrado).....	113
FOTO 127 (Aplicación de Desmoldante en Cimbra).....	113
FOTO 128 (Aplicación de Curaseal).....	113
FOTO 129 (Colocación de Tubería para Colado).....	118
FOTO 130 (Capacitación del Personal).....	118
FOTO 131 (Descenso del T-Lock).....	118
FOTO 132 (Colocación de T-Lock).....	118
FOTO 133 (Colocación de T-Lock).....	118
FOTO 134 (Colocación de T-Lock).....	118
FOTO 135 (Sellado en Junta de T-lock).....	119
FOTO 136 (Sellado en Junta de T-lock).....	119
FOTO 137 (Filtración de Concreto entre Cimbra y T-Lock).....	119
FOTO 138 (Filtración de Concreto entre Cimbra y T-Lock).....	119
FOTO 139 (Filtración de Concreto entre Cimbra y T-Lock).....	119
FOTO 140 (Filtración de Concreto entre Cimbra y T-Lock).....	119
FOTO 141 (Placa Metálica).....	119
FOTO 142 (Placa Metálica).....	119
FOTO 143 (Colado en Túnel).....	120
FOTO 144 (Movimiento de Cimbra).....	120
FOTO 145 (Se Fija T-lock a Clave de Cimbra).....	120
FOTO 146 (Colado).....	120
FOTO 147 (Limpieza Después de Colado).....	121
FOTO 148 (Curado de Concreto).....	121
FOTO 149 (Sellado de Juntas de T-lock).....	121
FOTO 150 (Sellado de Juntas de T-lock).....	121
FOTO 151 (Visita de Ramón Aguirre Díaz).....	121
FOTO 152(Visita de Ramón Aguirre Díaz).....	121
FOTO 153 (Visita de Marcelo Ebrad Casaubón).....	121

FOTO 154 (Visita de Marcelo Ebrad Casaubón)).....	121
FOTO 155 (Visita de Alumnos de La Fac. de Economía de la UNAM)).....	122
FOTO 156 (Ultimo Colado).....	122
FOTO 157 (Limpieza de Ultimo Colado).....	122
FOTO 158 (Ultimo Colado).....	122
FOTO 159 (Desmantelamiento de Tubería).....	122
FOTO 160 (Conexión entre los Tramos L8A-L8C, Mediante Concreto Lanzado).....	122
FOTO 161 (Conexión entre los Tramos L8A-L8C, Mediante Concreto Lanzado).....	122
FOTO 162 (Conexión entre los Tramos L8A-L8C, Mediante Concreto Lanzado).....	123
FOTO 163 (Conexión entre los Tramos L8A-L8C, Mediante Concreto Lanzado).....	123
FOTO 164 (Retiro de Maquinaria de la Lumbera).....	123
FOTO 165 (Retiro de Cimbra a la Lumbera 11).....	123
FOTO 166 (Preparación de Superficie para la aplicación de Sylpyl).....	123
FOTO 167 (Preparación de Superficie para la aplicación de Sylpyl).....	123
FOTO 168 (Aplicación de Sylpyl Contra los Gases).....	124
FOTO 169 (Aplicación de Sylpyl Contra los Gases).....	124
FOTO 170 (Aplicación de Sylpyl Contra los Gases).....	124
FOTO 171 (Aplicación de Sylpyl Contra los Gases).....	124
FOTO 172 (Prueba de Calidad al recubrimiento Sylpyl).....	125

ÍNDICE DE ESQUEMAS

CAPÍTULO 1 DRENAJE PROFUNDO Y OBRAS COMPLEMENTARIAS

Esquema 1 (Conexión Gran Canal).....16

CAPÍTULO 2 ANTECEDENTES

Esquema 2 (Diseño de Escudo).....55

CAPÍTULO 3 EVALUACION DEL DRENAJE PROFUNDO (DF)

Esquema 3 (Ubicación por Daños).....78

CAPÍTULO 4 ACCIONES DE MITIGACIÓN PARA MEJORAR LA OPERATIVIDAD DEL DRENAJE PROFUNDO

Esquema 4 (Red del Drenaje Profundo).....92

GLOSARIO

Albarradón:
Dique de contención.

Wild N2:

El nivel de ingeniero Wild N2 (NK2) es un instrumento sólido y seguro que tiene una alta precisión de medición; es de un empleo ideal en obras públicas y en la construcción, en las mediciones para la industria y en los polígonos de nivelación.



Zeniss:

Primer empresa dedicada a la construcción de niveles topográficos



Koni: Nivel Topografico



Hidrograma: Es un gráfico que representa los gastos con respecto del tiempo de alguna información tal como: nivel de agua, caudal, carga de sedimentos, entre otros. Para un río, arroyo o canal

Hietograma: Se aplica a una cuenca con objeto de graficar las alturas de precipitación en función del tiempo, el cual se toma arbitrariamente.

Lapilli: Fragmento de roca piroclásticas (ceniza)

Montmorilloníta: Es un mineral del grupo de los silicatos, subgrupo filosilicatos y dentro de ellos pertenece a las llamadas arcillas. Recibe su nombre de la localidad francesa de Montmorillon. Se caracteriza por una composición química inconstante. Es soluble en ácidos y se expande al contacto con agua. Estructuralmente se compone por una capa central que

contiene aluminio y magnesio coordinados octaédricamente en forma de óxidos e hidróxidos.

Chiquihuite: Forma parte de la Sierra de Guadalupe y está localizado en el norte del Distrito Federal, en la Delegación Gustavo A. Madero, limitando con el municipio de Tlalnepantla de Baz en el estado de México. Tiene una altura de 2,730 msnm. Geológicamente se trata de un domo volcánico de carácter exógeno, constituido por rocas dacíticas dispuestas en unidades de flujo con espesores variables, muy intemperizadas, fuertemente fracturadas y afalladas.

Lahar: Flujo de materiales volcánicos

Andesita: Roca ígnea volcánica de composición intermedia

Ignimbrita: Roca ígnea volcánica consiste e una toba dura de fragmentos de fenocristales en una matriz.

Pumitas: Es una roca ígnea volcánica vítrea, con baja densidad (flota en el agua) y muy porosa, de color blanco o gris (piedra pómez).

Caolín: Tipo de arcilla muy fina de color blanco

Basalto: Roca ígnea volcánica de color oscura, compuesta de silicatos de magnesio y hierro, bajo en sílice

Clásticos: Están formados por diferentes tipos de roca volcánicas

Coeficiente Rankine: Es un campo de tensiones que predice las presiones activas y pasivas de un determinado terreno.

Hipótesis de Navier: Es un enunciado sobre la mecánica de sólidos deformables. Viene a afirmar que las secciones planas permanecen planas a lo largo del proceso de deformación, incluso en la región plástica.

Reología: Estudio de la deformación y la forma de fluir de la materia

Curacreto: Mejoran las características del concreto como es el tiempo de fraguado, dureza, flexibilidad.

Sylpyl: Empresa que se dedica a la fabricación de pinturas anticorrosivas epóxicas industriales.

BIBLIOGRAFIA

<http://www.jcpinrep.com/productos/levels.html> (año de búsqueda 2013)

Juan Miquel Canet, (2006), *Cálculo de estructuras: Fundamentos y estudio de secciones*, Ed. UPC.

Memoria de las obras del Sistema de Drenaje Profundo del Distrito Federal, Tomo III, 1975.

Apuntes tomados en clase y datos tomados en la zona de trabajo.