

2eje. 6



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO DE LUMBRERAS
PARA LA APLICACION DE LA SUBEXCAVACION EN
LA CATEDRAL Y SAGRARIO METROPOLITANOS

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE

I N G E N I E R O C I V I L

P R E S E N T A N

MIGUEL ANGEL ALVIZO TORRES

FERNANDO NAVA CASTREJON



MEXICO, D. F.

1994

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

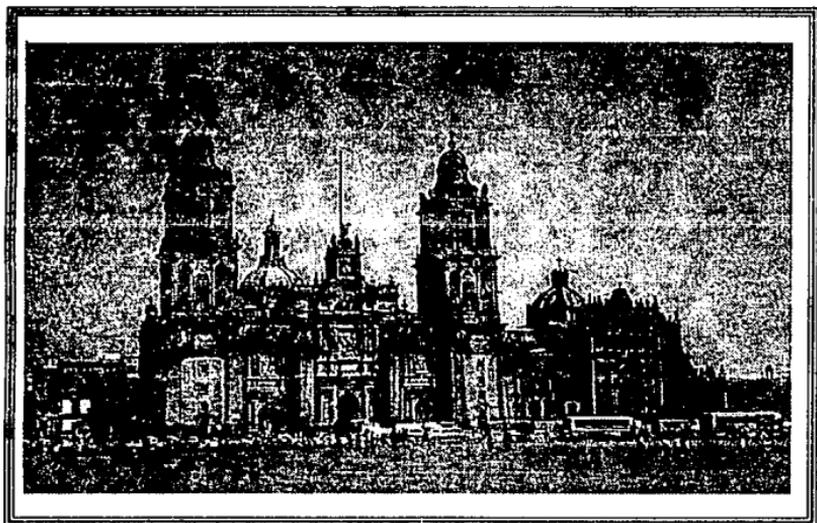


UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



Catedral y Sagrario
Metropolitanos

A mis Padres:

Pedro Nava Hernández
V
Antonia Castrejón Gutiérrez

a quienes les debo todo, por su valioso apoyo y gran esfuerzo que me brindaron durante mi formación y que juntos hemos enfrentado los momentos más difíciles de la vida.

En especial a mi madrecita lúida por guiarme por el buen camino de la vida.

A mis hermanos:

Yolanda
Francisco Javier
Victor Manuel
Melchor
Oscar

por que de alguna manera u otra forma le sirva de un estímulo a mi hermano el mas chico "Oscar" por continuar con sus estudios.

A mi tía:

Flor Escudero Sánchez.

por sus buenos consejos y animo que me levanta para seguir adelante con mis estudios.

A mi director de tesis:

Ing. Rafael Aburto Valdez.

por su gran apoyo y dirección de este tema.

A los Ingenieros de la Empresa Constructora "CGC".

Dr. Fscain Ovando S.
Ing. Oscar Cuauhtli C.
Ing. Victor Takahashi K.

Por su gran apoyo e información que nos proporcionaron durante el tiempo en la realización de este tema.

A:

Arq. Fernando Pineda G.
F
Ing. Rodolfo Martínez B.

por su gran ayuda y asesoría que nos proporcionaron.

A la:

Universidad Nacional Autónoma de México.

por ser una Institución de alto nivel y de gran prestigio.

A la:

Facultad de Ingeniería .

por darme los conocimientos para la formación de mi carrera.

A mis amigos:

Angélica González.
Patricia S. Ramos C.
Martha Rodríguez A.
Reina Aza. Elisabeth Rodríguez A.
José Luis Galicia A.
José Luis Cadenza A.
Juvencio Cruz R.
Omar García R.

por esas buenas amistades que durante mucho tiempo hemos seguido .

A todos ellos Gracias.





UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-1-209/93

Señores
MIGUEL ANGEL ALVIZO TORRES
FERNANDO NAVA CASTREJON
Presente.

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor ING. RAFAEL ABURTO VALDES que aprobó esta Dirección, para que lo desarrollen ustedes como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

**"PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO DE LUMBRERAS PARA LA APLICACION DE
LA SUBEXCAVACION EN LA CATEDRAL Y SAGRARIO METROPOLITANOS"**

- I. INTRODUCCION
- I. CARACTERISTICAS GENERALES SOBRE EL ORIGEN DEL SUELO DEL VALLE DE MEXICO
- II. DESCRIPCION DE LA CIMENTACION EN LA CATEDRAL Y SAGRARIO METROPOLITANOS
- III. ESTRATIGRAFIA DE LA ZONA DE LA CATEDRAL
- IV. ASENTAMIENTOS Y POSIBILIDADES DE CORRECCION
- V. ALTERNATIVAS POSIBLES PARA LA CONSTRUCCION DE LUMBRERAS
- VI. CONSIDERACIONES TEORICAS SOBRE LA ESTABILIDAD EN LA EXCAVACION DE LUMBRERAS
- VII. PROCESO CONSTRUCTIVO DE LA LUMBRERA SELECCIONADA
- VIII. PROCEDIMIENTO DE SUBEXCAVACION
- CONCLUSIONES

Ruego a ustedes cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo les recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberán prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria, 31 de enero 1994
EL DIRECTOR

ING. JOSE MANUEL COVARRUBIAS SOLIS

JMCS/RCR*mccm



PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO DE LUMBRERAS PARA LA APLICACION DE LA SUBEXCAVACION EN LA CATEDRAL Y SAGRARIO METROPOLITANOS

	INTRODUCCION	i
1.-	CARACTERISTICAS GENERALES SOBRE EL ORIGEN DEL SUELO DEL VALLE DE MÉXICO.....	1
	1.1.- GENERALIDADES.....	4
	1.2.- ESTRATIGRAFIA GENERAL.....	7
	1.3.- CARACTERISTICAS GENERALES DE LA FORMACION DE LOS SUELOS.....	9
2.-	DESCRIPCION DE LA CIMENTACION EN LA CATEDRAL Y SAGRARIO METROPOLITANOS.....	12
	2.1.- BOSQUEJO HISTORICO.....	13
	2.2.- CIMENTACIONES ORIGINALES.....	18
	2.3.- RECIMENTACIONES.....	22
3.-	ESTRATIGRAFIA DE LA ZONA DE LA CATEDRAL.....	29
	3.1.- TRABAJOS DE CAMPO Y LABORATORIO.....	30
	3.2.- ESTRATIGRAFIA DEL SITIO.....	31
	3.3.- NIVELES PIEZOMETRICOS.....	36
4.-	ASENTAMIENTOS Y POSIBILIDADES DE CORRECCIÓN.....	39
	4.1.- ANALISIS DE CAUSAS QUE ALTERAN AL TERRENO.....	40
	4.2.- EVOLUCION DE LOS HUNDIMIENTOS DE LA CATEDRAL.....	42
	4.3.- EVOLUCION DE LOS HUNDIMIENTOS DEL SAGRARIO.....	45
	4.4.- POSIBILIDADES DE CORRECCION AL COMPORTAMIENTO DE LAS CIMENTACIONES.....	47
5.-	ALTERNATIVAS POSIBLES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LUMBRERAS.....	52
	5.1.- LIMITACIONES EN CUANTO A LA CONSTRUCCION DE LUMBRERAS.....	53
	5.2.- TÉCNICAS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LUMBRERAS.....	53
	5.3.- METODOS PARA EL ABATIMIENTO DEL AGUA EN EXCAVACIONES.....	69
	5.4.- ANALISIS PARA LA CONSTRUCCION DE LUMBRERAS Y METODOS PARA EL CONTROL DE AGUA EN EXCAVACIONES ENFOCADAS A LAS CARACTERISTICAS DE LA ZONA DE CATEDRAL.....	77
6.-	CONSIDERACIONES TEÓRICAS SOBRE LA ESTABILIDAD EN LA EXCAVACIÓN DE LUMBRERAS.....	78
	6.1.- PRESIONES RADIALES.....	79
	6.2.- FALLA DE FONDO.....	81
	6.2.- FALLA POR SUBPRESION.....	83
	6.3.- FALLA POR EXTRUSION.....	88

7.-	PROCESO CONSTRUCTIVO DE LA LUMBRERA SELECCIONADA	90
	<i>7.1.- INTRODUCCION.....</i>	<i>91</i>
	<i>7.2.- PROBLEMAS Y OBJETIVOS</i>	<i>91</i>
	<i>7.3.- ZONAS DE COMPORTAMIENTO.....</i>	<i>93</i>
	<i>7.4.- TRABAJOS ADICIONALES.....</i>	<i>94</i>
	<i>7.5.- PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO.....</i>	<i>96</i>
8.-	PROCEDIMIENTO DE SUBEXCAVACION.....	121
	<i>8.1.- INTRODUCCION.....</i>	<i>122</i>
	<i>8.2.- IDENTIFICACION DE BOQUILLAS</i>	<i>124</i>
	<i>8.3.- EQUIPO DE SUBEXCAVACION.....</i>	<i>125</i>
	<i>8.4.- PERSONAL DE SUBEXCAVACION</i>	<i>126</i>
	<i>8.5.- TERMINOS EMPLEADOS EN LA SUBEXCAVACION.....</i>	<i>127</i>
	<i>8.6.- METODOLOGIA DE SUBEXCAVACION.....</i>	<i>128</i>
	<i>8.7.- CONTROLES PARA EL PROCEDIMIENTO DE SUBEXCAVACION.....</i>	<i>130</i>
	<i>8.8.- ETAPAS DE SUBEXCAVACION.....</i>	<i>133</i>
9.-	CONCLUSIONES	iii
	GLOSARIO	v
	BIBLIOGRAFIA.....	vi

INTRODUCCION

El proyecto de rectificación geométrica de la Catedral Metropolitana de la Ciudad de México es una obligación primordial para con la sociedad y la nación a quien pertenece como una de las joyas histórica más preciadas.

El presente trabajo desarrolla y describe los aspectos más relevantes de la Catedral, iniciando con las características generales del suelo del Valle de México, continuando con el proceso constructivo de su cimentación hasta la estructura final que conocemos actualmente y tomando en cuenta los estudios realizados que se han venido generando con respecto a sus asentamientos, acumulados desde la iniciación de la construcción y más notablemente durante este siglo.

Se realiza un estudio de las alternativas posibles para la rectificación geométrica de la Catedral donde se adoptó el procedimiento de subexcavación como la alternativa más viable, desarrollando un estudio previo a base de sondeos de cono eléctrico para conocimiento previo de la estratigrafía de la zona, que es indispensable saber para la selección de la técnica más adecuada y la construcción de lumbreras a fin de poder aplicar la subexcavación, las cuales se van a localizar dentro y fuera de la Catedral Metropolitana, donde se describe el proceso constructivo de la técnica de la lumbrera seleccionada y el procedimiento de subexcavación.

Mencionamos a continuación una relevanza de los aspectos a considerar en el siguiente trabajo.

El templo se proyectó con el Altar Mayor hacia el Oriente, al igual que la antigua Catedral de Hernán Cortés, pero entre otras razones en ese lugar los suelos eran tan blandos que se decidió girarlo hacia el Norte y diseñarlo de tal modo que el frente viera al Sur, a fin de aprovechar el subsuelo preconsolidado por los basamentos de templos y construcciones Aztecas en donde hay zonas que se encuentran edificaciones a 2 m y otras a casi 7 m por debajo del nivel del suelo; sin embargo, la ubicación y dimensiones de las monumentos prehispánicos indujeron esfuerzos de preconsolidación variables en las arcillas subyacentes, causando zonas de preconsolidación desigual. El hundimiento del centro histórico y de las zonas periféricas de la capital se debe a la sobre-explotación de los mantos acuíferos subterráneos, ya que de ellos se extrae el 70 % del agua que se consume en la Ciudad de México, y por la presión que ejerce la construcción de grandes edificios sobre el subsuelo.

De 1900 a 1970 el centro de la Ciudad de México se ha hundido 9 m en promedio y en el mismo lapso, la Catedral Metropolitana tuvo un hundimiento de 6.30 m causados también por la heterogeneidad del subsuelo. Actualmente el promedio es de 7.4 cm por año, de continuar esta tendencia, en 60 años la Catedral desaparecería con toda su bagaje histórico y cultural, aunque previamente la Catedral y el Sagrario tendrían un colapso en la unión de ambas estructuras.

Los asentamientos acumulados a través de 419 años, esto es desde el inicio de la construcción hasta la actualidad, han provocado desplomes de muros, columnas, fracturamientos estructurales en pilastras, así como elongación y distorsiones de la cuerda de los arcos formeros de las bóvedas, cuya magnitud resulta inadmisibles particularmente en los casos en los que la resultante de las cargas se encuentra en su porción límite del tercio medio de la sección transversal y en ocasiones fuera de él, generando zonas de tensión; y también generando un diferencial máximo de 2.42 m entre el abside y la torre poniente y de 1.25 m entre ambas torres, se han requerido de frecuentes reparaciones tanto en la cimentación como en la estructura.

La seguridad de la construcción "es satisfactoria", pero muy cerca al límite, por eso se ha apuntalado efectivamente, lo cual la protege de los efectos imprevistos durante el proceso de subexcavación que se está llevando a cabo, así como de los sismos. El 50 % del deterioro de la Catedral y Sagrario Metropolitanos, se ha presentado a partir de 1940, cuando la explosión demográfica aumentó en la Ciudad de México.

Las alternativas de solución analizadas fueron desde la recimentación con pilotes y pilas, la recarga del acuífero y la subexcavación de las partes altas. Esta última se consideró actualmente la más adecuada, lo que condujo a aplicarla; dejando abierta la posibilidad de recargar el acuífero. Si en el futuro se desarrolla otra técnica, la subexcavación incluyendo la recarga del acuífero no será un obstáculo para su aplicación.

Capítulo 1

CARACTERÍSTICAS
GENERALES SOBRE EL
ORIGEN
DEL SUELO DEL
VALLE DE MEXICO

1.1.- Generalidades

1.2.- Estratigrafía General

1.3.- Características Generales de la formación de los Suelos

CARACTERÍSTICAS GEOLOGICAS SOBRE EL ORIGEN DEL SUELO DEL VALLE DE MEXICO

El Valle de México era una cuenca cerrada hasta 1798 año en que se abrió el tajo de Nochistongo; está limitado hacia el Norte por las sierras de Tepotztlán, Tezontlalpan y Pachuca, al Este por los montes de Calpulalpan, Río Frio y la sierra Nevada, al Sur por las sierras del Ajusco y el Chichinautzin, al Oeste la sierra de las Cruces (figura 1.1). Otras dos sierras más pequeñas atraviesan parcialmente la cuenca de Este a Oeste: las de Guadalupe y Santa Catarina. Tiene una superficie de 7160 Km² de los cuales 3080 corresponden a áreas montañosas y 2050 a las partes bajas, las primeras con altitudes superiores a 200 m sobre el fondo del Valle y las segundas comprendidas entre 0 y 50 m. La altura sobre el nivel del mar de la zona más baja es de 2240 m.

El Distrito Federal ocupa una superficie de 1480 Km² en la región sureste del Valle y en ella se levanta la Ciudad de México.

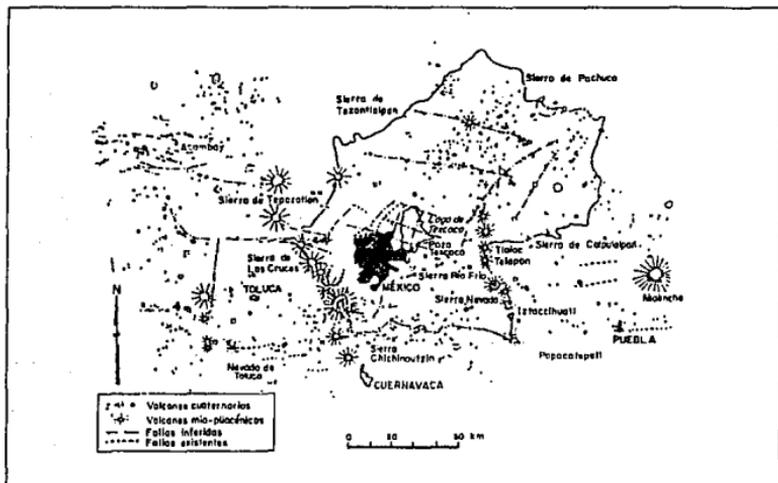


figura 1.1

Para comprender con mayor claridad lo que a continuación vamos a mencionar es necesario saber primeramente que el Valle de México según Marsal y Mazari por medio de estudios zonificaron el Valle en tres grandes áreas o zonas de acuerdo a sus características estatuísticas (figura 1.4), que son:

- I. Zona de Las Lomas
- II.- Zona de Transición
- III.- Zona del Lago

La zona del Lago la subdividieron en dos áreas que son:

- a) La primera que abarca la Ciudad antigua y en la que son frecuentes las diferencias de asentamientos por preconsolidación, notorias hasta dentro de los límites de un predio, la que se localiza en la Catedral Metropolitana y se enfoca nuestro estudio.
- b) La segunda cubriendo aquella parte de la Ciudad que no fue cargada antes.

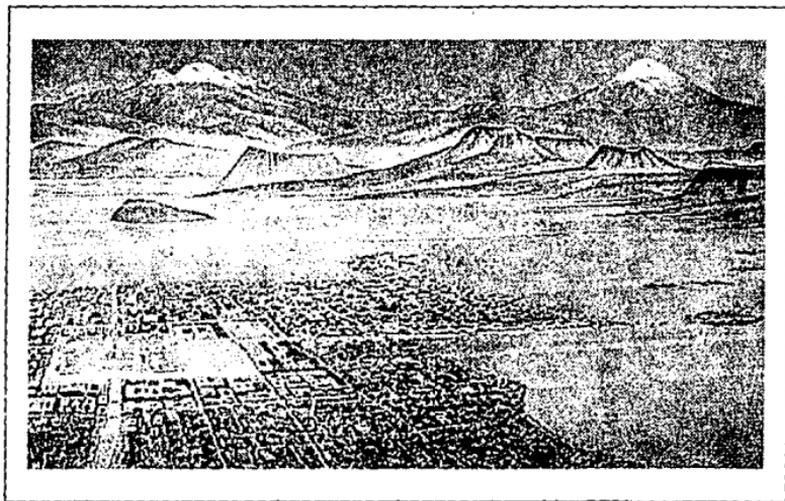


figura 1.2

1.1.- GENERALIDADES

Para comprender la naturaleza geológica de los depósitos sobre los que se edifica la Cd. de México, es necesario considerar los siguientes tres marcos de referencia: el geológico general, el paleo climático y el vulcanológico.

MARCO GEOLOGICO GENERAL

La cuenca de México asemeja una enorme presa azolvada, la cortina, situada al Sur está representada por los basaltos de la sierra del Chichinautzin, mientras que los rellenos del vaso están constituidos en su parte superior por arcillas lacustres y en su parte inferior por clásticos derivados de la acción de ríos, arroyos, glaciares y volcanes.

El conjunto de rellenos contiene además capas de cenizas y estratos de pómez producto de las erupciones volcánicas menores y mayores durante el último medio millón de años o sea en el Pleistoceno Superior, que es aproximadamente el lapso transcurrido a partir del inicio del cierre de la cuenca.

También se reconocen en el citado relleno numerosos suelos, producto de la meteorización de los depósitos volcánicos, fluviales, aluviales y glaciales; estos suelos, hoy transformados en paleosuelos o tobas, llevan el sello del clima en que fueron formados siendo a veces amarillos, producto de ambientes fríos y otras veces cafés y hasta rojizos, producto de ambientes moderados a subtropicales.

Sobre este complejo relleno ha crecido la Ciudad de México. Desde la fundación de Tenochtitlán, hará 600 años, los pobladores del lugar han tenido que enfrentarse a las características difíciles del relleno central; hacia la mitad del siglo XX, sus edificios y obras se fueron desplantando sobre los rellenos correspondientes al borde de la planicie y en lo que va de la segunda mitad de la centuria, la urbe se ha extendido aún más, rebasando los límites de la planicie y subiendo a los extensos flancos occidentales de la cuenca, espacio cubierto por los abanicos volcánicos de la sierra de las Cruces, conocido como Las Lomas. Sus depósitos clásticos difieren en mucho en los depósitos arcillosos superficiales del centro de la cuenca.

MARCO PALEOCLIMATICO

El clima uniformemente cálido y a menudo desértico del Plioceno, en las latitudes de la Meseta Central Mexicana, cedió a climas cambiantes y extremos del Pleistoceno. Las causas de esta mutación, que afectó a toda la Tierra hace 2 millones de años aún se desconocen.

Principió el cambio con ligeras oscilaciones de periodos calurosos a fríos, los que se fueron acentuando hasta hace 1 millón de años (tabla 1), cuando se inició una primera gran glaciación (Nebraska), con una duración aproximada de 100 000 años. Siguió un lapso de clima caluroso, el cual cedió renovadamente a un segundo período de glaciación prolongada (Kansas). Entonces se produjo un lapso extenso de clima caliente de unos 200 000 años. Este intervalo se denomina en Norteamérica el Gran Interglacial (Yarmouth); impero hace 400 000 a 600 000 años en todo el orbe.

Siguió un tercer período glacial (Illinois) para el cual se ha podido determinar dos avances separados por un período con climas moderado. Esta tercera glaciación termina al desarrollarse de nuevo un clima relativamente cálido a lo largo de 100 000 a 80 000 años; se le conoce como el Tercer Interglacial o Sangamon en Norteamérica. De nuevo se fue enfriando el clima, imponiéndose la cuarta glaciación (Wisconsin), caracterizada por tres oscilaciones y dos interglaciales de clima moderado; terminó hace 10 000 años aproximadamente. Es entonces que principio el Holoceno o Reciente, período climático considerado, tendiendo a caliente, o sea el actual.

De lo anterior se deriva que la cuenca del Valle de México, desde su cierre en el sur por los basaltos de la sierra del Chichinautzin, ha pasado por dos períodos de glaciación, el Illinois y el Wisconsin y dos interglaciales, el Yarmouth y el Sangamon.

PERIODOS GLACIALES E INTERGLACIALES

AÑOS	PERIODO	FORMACIÓN
10×10^3	HOLOCENO	RELLENOS RECIENTES
$80 - 10 \times 10^3$	GLACIACIÓN WISCONSIN	FORMACIÓN ARCILLOSA SUPERIOR
$100 - 80 \times 10^3$	INTERGLACIAL SANGAMON	PRIMERA CAPA DURA
$300 - 100 \times 10^3$	GLACIACIÓN ILLINOIS	2ª FORMACIÓN ARCILLOSA
$400 - 600 \times 10^3$	GRAN INTERGLACIAL YARMOUTH	DÉPOSITOS PROFUNDOS
?	GLACIACIÓN KANSAS	
?	INTERGLACIAL	
900×10^3	GLACIACIÓN NEBRASKA	

tabla 1

Hay que señalar que todas las manifestaciones glaciales descritas sobreyacen a secuencias de suelos rojos del tipo interglaciar o sea el Yarmouth. Este Horizonte indicador paleo climático define los fenómenos de origen glaciar como pertenecientes a la Tercera Glaciación.

Uno de los productos típicos acompañado de la existencia de glaciares son los suelos eólicos. Las llamadas brisas del valle y montaña que se desarrollan hoy en día en la cuenca, deben haberse acentuado extraordinariamente durante los climas glaciares, transformándose en vendavales. Es casi seguro que estos fuertes vientos acarreaban importantes volúmenes de partículas finas de polvo volcánico alterando al valle. Al precipitarse este polvo llamado loess en el Lago, se hidrataba fácilmente creando las conocidas arcillas lacustres del Valle; con este mecanismo se interpreta hoy que las arcillas son producto principal de la alteración físico-química de loess glacial.

MARCO VULCANOLÓGICO

Todo material contenido en los depósitos de la cuenca del Valle de México es directa o indirectamente de origen volcánico.

De origen volcánico *directo* son, por ejemplo, las lavas de los domos pliocénicos del cerro de Chapultepec y del cerro del Tepeyac. Lo son también las lavas, brechas, tezontles y cenizas del Peñón del Marqués, así como las de la sierra de Santa Catarina, con su hilería de conos escoreáceos juveniles rodeados de lavas y las coladas recientes del Pedregal de San Ángel originadas en el Xitle.

En el renglón de depósitos volcánicos *indirectos* se deben mencionar las acumulaciones de polvo eólico. Las regiones volcánicas de por sí abundan en detritos finos derivados de cenizas volcánicas. El viento levanta este polvo y lo transporta a veces a grandes distancias; si el viento los deposita en laderas durante periodos de clima frío, se transforma en suelos inmaduros que con el transcurso del tiempo se convierten en tobas amarillas que tanto abundan en Las Lomas

Relacionados con los periodos glaciales, especialmente a finales de ellos, están los deshielos, por los cuales crecieron arroyos y ríos caudalosos. Los deshielos generaron potentes depósitos fluviales que se reconocen hoy en numerosos puntos de las Lomas así como al pie de ellas en transición a la planicie central, formando abanicos aluviofluviales (Deltas).

2.1.- ESTRATIGRAFIA GENERAL

DEPOSITOS DEL LAGO

Los depósitos de la planicie del Valle de México son los que comúnmente se conocen como depósitos del lago. Hay que señalar que ello solamente es válido y correcto para ciertos tiempos geológicos con condiciones climáticas que propiciaban la existencia de un lago. En la cuenca cerrada podía existir un lago cuando las lluvias superaban a la evapotranspiración, el que desaparecía cuando ésta superaba a las lluvias. Obviamente, el factor que dominaba dicho equilibrio era la temperatura ambiental: si el clima se enfriaba, se formaba un lago; si se calentaba, el lago disminuía y hasta desaparecía.

Como consecuencia de lo anterior se presentaban transgresiones y regresiones lacustres. El resultado práctico de esta alternancia fue la depositación de arcillas o formación de suelos. El lago subsistía durante las épocas de calor (sequía) en las partes centrales de la cuenca, continuando aquí la depositación de arcillas lacustres; en las partes marginales (transición) ocurría lo contrario, donde entre arcillas lacustre se intercalaban suelos de pradera.

En la figura 1.3 se presenta en forma sintética la interpretación de la estratigrafía, propuesta por Mooser.

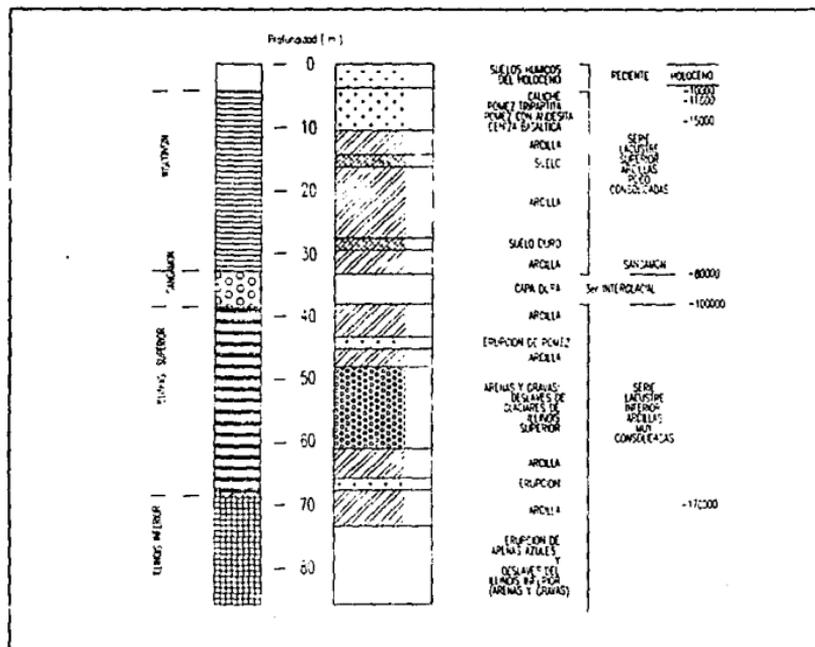


figura 1.3

DEPOSITO DE TRANSICION

Los depósitos lacustres del centro de la cuenca van cambiando a medida que se acercan al pie de las Lomas; lo que ocurre es que entre las arcillas lacustres van intercalándose capas de suelos limosos, cuerpos de arenas fluviales y, en ciertos casos, en la desembocadura de arroyos y ríos, importantes depósitos de gravas y boleos.

Obviamente, las aportaciones fluviales de las Lomas al gran vaso de sedimentación, que es la planicie, se depositan especialmente en el quiebre morfológico Lomas-Planicie (figura 1.4)

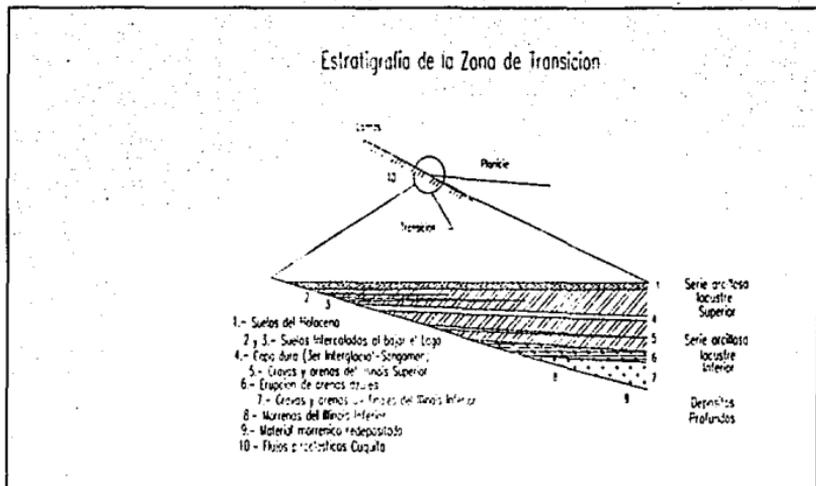


figura 1.4

DEPOSITOS DE LAS LOMAS

En la secuencia estratigráfica de las Lomas se identifican tres fenómenos geológicos:

- La erosión subsiguiente de estos depósitos, formándose profundas barrancas.
- El depósito en las barrancas de morrenas y
- El relleno parcial de esas barrancas con los productos clásticos de nuevas erupciones.

1.3.- CARACTERISTICAS GENERALES DE LA FORMACION DE LOS SUELOS

ZONA DEL LAGO

Los suelos arcillosos blandos son la consecuencia del proceso de depósito y de alteración físico-química de los materiales eólicos, aluviales y de las cenizas volcánicas en el ambiente lacustre, donde existían abundantes colonias de microorganismos y vegetación acuática; el proceso sufrió largas interrupciones durante los periodos de intensa sequía, en los que el nivel del lago bajo y se formaron costras endurecidas por deshidratación o por

secado solar. Otras breves interrupciones fueron provocadas por violentas etapas de actividad volcánica, que cubrieron toda la cuenca con mantos de arena basálticas o pumíticas; eventualmente, en los periodos de sequía ocurría también una erupción volcánica, formándose costras duras cubiertas por arenas volcánicas.

El proceso descrito formó una secuencia ordenada de estratos de arcilla blanda separados por lentes duros de limos y arcillas arenosas, por las costras secas y por arenas basálticas o pumíticas producto de las emisiones volcánicas. Los espesores de las costras duras por deshidratación solar tienen cambios graduales debido a las condiciones topográficas del fondo del lago; alcanzan su mayor espesor hacia las orillas del vaso y pierden importancia y aún llegan a desaparecer al centro del mismo. Esto último se observa en el vaso del antiguo lago de Texcoco, mostrando que esta región tuvo escasos y breves periodos de sequía.

ZONA DE TRANSICION

Los depósitos de transición forman una franja que divide los suelos lacustres de las sierras que rodean al valle y de los aparatos volcánicos que sobresalen en la zona del lago. Estos materiales, de origen aluvial, se clasifican de acuerdo al volumen de clásticos que fueron arrastrados por las corrientes hacia el lago y la frecuencia de los depósitos; así se generaron dos tipos de transiciones: interestratificada y abrupta.

Interestratificada: Esta condición se presenta en los suelos que se originaron al pie de barrancas, donde se acumularon los acarreo fluviales que descendieron de las Lomas a la Planicie.

Abrupta: Esta condición se identifica en el contacto entre los rellenos de la cuenca y los cerros que sobresalen de dicho relleno, a manera de islotes; en este caso, los depósitos fluviales al pie de los cerros son prácticamente nulos, lo cual origina que las arcillas lacustres estén en contacto con la roca.

ZONA DE LAS LOMAS

La zona de Las Lomas está formada por las serranías que limitan a la cuenca al poniente y al Norte, además de los derrames del Xitle al SSW; en las sierras predominan tobas compactas de cementación variable, depósitos de origen glacial y aluviones.

ZONIFICACION DE LA CIUDAD DE MEXICO
DEL PUNTO DE VISTA
ESTRATIGRAFICO

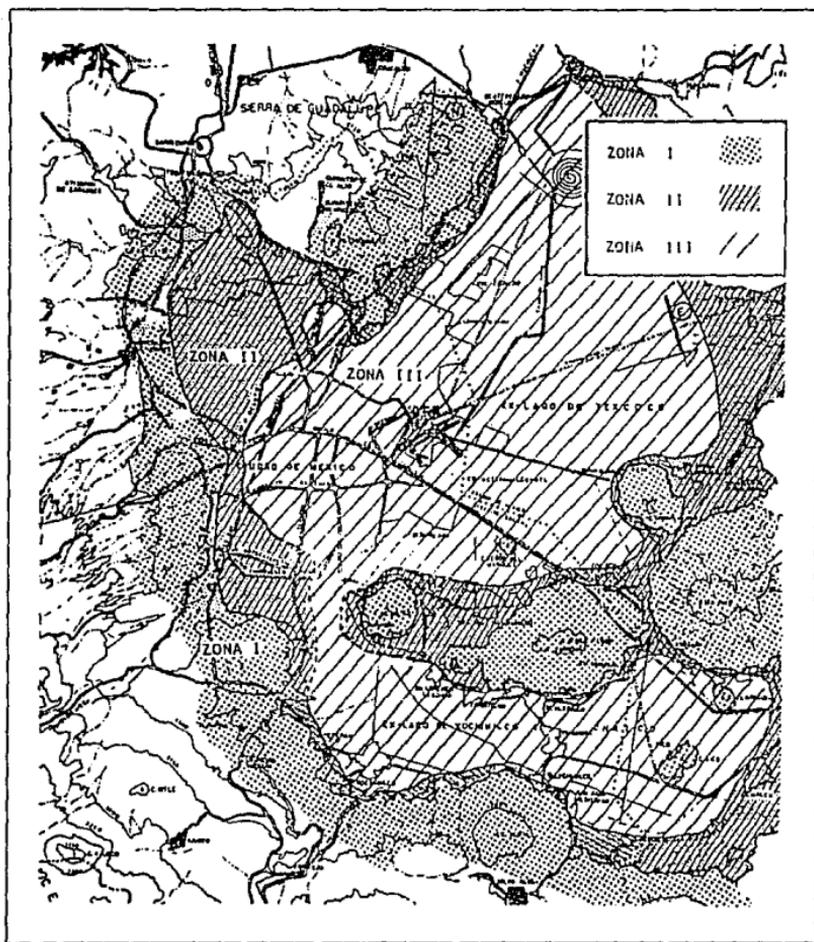


figura 1.5

Capítulo 2

DESCRIPCION DE LA CIMENTACION EN LA CATEDRAL Y SAGRARIO METROPOLITANOS

2.1.- Bosquejo Historico

2.2.- Cimentaciones Originales

2.3.- Recimentaciones

2.1.- BOSQUEJO HISTORICO

La Catedral Metropolitana de la Ciudad. de México, es el más bello y majestuoso templo de los quince mil que se construyeron en la Nueva España; incluso se le considera como el más importante templo de América.

El sitio elegido por el conquistador para la construcción de la Catedral, es parte de lo que fue el centro ceremonial Azteca, quedando bajo su cimentación restos de algunas de sus estructuras como se muestra en la figura 2.1, las posiciones relativas señaladas según historiadores.

En el año de 1524 corresponde al principio de la construcción de la Iglesia Mayor, localizada frente al terreno ocupado actualmente por la presente Catedral y quedó totalmente edificado para el año de 1528 (figura 2.2).

La Catedral actual inicio su construcción en el año de 1536, concluyéndose en una primera etapa, al cierre de la cúpula como terminación de la obra interior y hacia el año de 1813 la terminación de la obra exterior y la culminación de la Catedral.

Como la Catedral crecía en suntuosidad y magnificencia, se pensó en construir un templo para la Catedral, en vista de que una parroquia tan poblada carecía de un local adecuado.

Por lo tanto, se mando construir el Sagrario; durante los años de 1749 que inicio su construcción hasta 1763 en que fue terminado.

Se presenta también una cronología de la construcción y eventos significativos que ocurrieron desde la conquista, hasta nuestros días. (tabla 2.1)

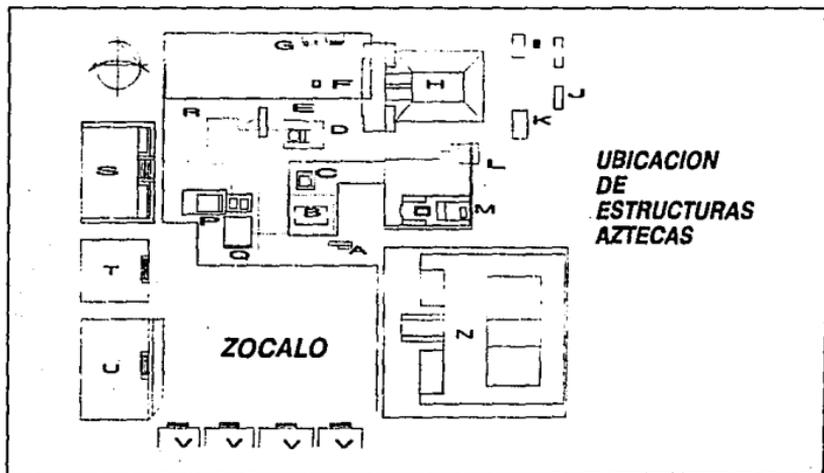
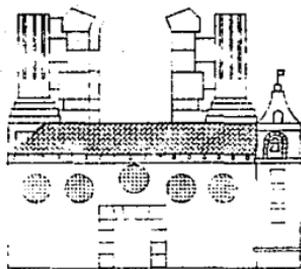
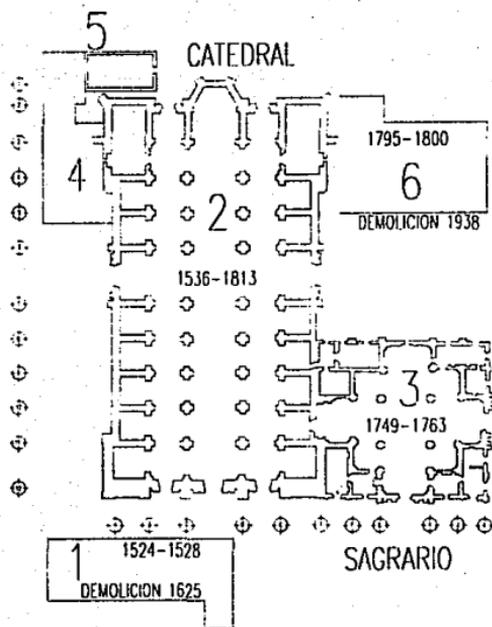


figura 2.1

NOMENCLATURA

A	Sala de Armas
B	Tezcatzoncatl
C	Cuauhxicl de Xocotl
D	Teatro
E	Sala de Armas
F	Quetzalcoatl
G	Coatcacalli
H	Templo Mayor
I	Sala de Armas
J	Sala de Armas
K	Monasterio de muchachos
L	Chicomeceuatl
M	Tezcatlipoca
N	Palacio de Moctezuma
P	Yopico
Q	Templo del Sol
R	Altar - Huey Tzompantli
S	Palacio de Itzcoatl
T	Palacio de Moctezuma
U	Cuicaculli - Pellacoico
V	Casa de Nobles o Residentes Particulares de Señores

Nota: INTERPRETACIONES DE ALCOCER
"ARQUITECTURA PREHISPANICA"
INSTITUTO NACIONAL DE ANTROPOLOGÍA
E HISTORIA.



La Primera Catedral de México, según plano de 1596 (Archivo de Indias Sevilla)

figura 2.2

No.	Descripción	Fecha de Construcción	Fecha de Demolición
1	Catedral Antigua	1524 - 1528	1625
2	Catedral Metropolitana	1536 - 1813	-
3	Sagrario	1749 - 1763	-
4	Actual Museo	1725	-
5	Capilla de las Animas	1725	-
6	Seminario	1795 - 1800	1938

AÑO	CRONOLOGÍA
1473	La ciudad Azteca media 1 Km ²
1487	Terminación del gran Templo Azteca
1521	Conquista de México
1524	Inicio de la construcción de la Catedral Vieja
1536	Colocación de la Primera piedra de la Catedral Actual
1555	Primera Dedicación de la Catedral
1563	Inicio de Construcción de la Catedral
1573	Pedraplén terminado (Arq. Claudio Arciniegas)
1608	Apertura del túnel de Nochistongo
1615	Los muros estaban a más de la mitad de su altura
1623	Terminación de la Sacristía (30% Total)
1625	Demolición de la Vieja Catedral
1629	Gran inundación de la ciudad (Relleno perimetrales)
1642	Inicio de la construcción de las torres y revestimiento de la fachada con cantera (toba volcánica).
1645	(60% Total del peso total)

AÑO	CRONOLOGÍA
1656-1672	Se completo la fachada
1660	Terminación de las 3 Naves (80% Total)
1661	Segunda dedicación de la Catedral
1667	Terminación de la Catedral (90 % del peso total)
1749	Inicio de la construcción del Sagrario
1768	Terminación del Sagrario
1780	Inicio de la construcción de las fachadas
1789	Se transforma el túnel en el tajo de Nochistongo
1792	Terminación de las 2 Torres (100 %)
1793	Arq. Manuel Tolsá
1795	Construcción del Seminario
1813	Terminación de las obras de la Catedral por el Arq. Manuel Tolsá, que concluyó las esculturas, ornamentos, balaustradas y el reloj
1929	Estudio del Arq. Manuel Ortiz Monasterio
1938	Demolición del Seminario para descargar zona oriente
1940-1945	Vaciado de las celdas. Reforzamiento de contrarabes y construcción de criptas "Arq. M. Ortiz Monasterio"
1972-1973	Sondeos geotécnicos de Ingeniería Experimental (Colinas de Buen)
1974-1976	Hincado de los pilotes de recimentación para detener los hundimientos de la zona sur del monumento (la capacidad de carga de los pilotes es de tan solo del 16% del peso total)

tabla 2.1

2.2.- CIMENTACIONES ORIGINALES

CATEDRAL:

Fué construida entre los años de 1536 y 1813, su ancho es de 66.36 m y su longitud 122.26 m aproximadamente; consta de cinco naves; una cúpula central, dos procesionales y dos laterales divididas en capillas por gruesos muros de mampostería y cuenta además con dos Torres de 60 m de altura. Se construyó sobre un basamento constituido por una Reticula de Contratraves de Mampostería (mortero de cal y arena con roca basáltica y algo de tezontle) de 3.60 m de peralte, que se apoya sobre un Pedraplén de Mampostería de Tezontle de 0.99 a 2 m de espesor máximo al Sur y 1.20 m al Norte (firme de mortero a base de cal y arena, colocada sobre una delgada capa de carbón vegetal); el Pedraplén descansa sobre un firme de 28 a 30 cm de espesor (mortero de cal y arena con roca basáltica y algo de tezontle) que sirve de cabezal a una retícula de estacones de madera de 20 cm de diámetro y de 2 a 3 m de longitud, espaciados cada 0.60 m sobre toda el área del pedraplén. Se dice que originalmente se pensó en construir una Catedral de mayor tamaño y que por esta razón el pedraplén sobresale aproximadamente unos 10 m en la periferia de la Catedral (figura 2.4 y 2.5).

El peso total de la estructura es de 127,344 ton y la presión que transmite al subsuelo es del orden de 12.2 ton/m².

En la figura 2.3 se muestra la secuencia constructiva de la Catedral Metropolitana.

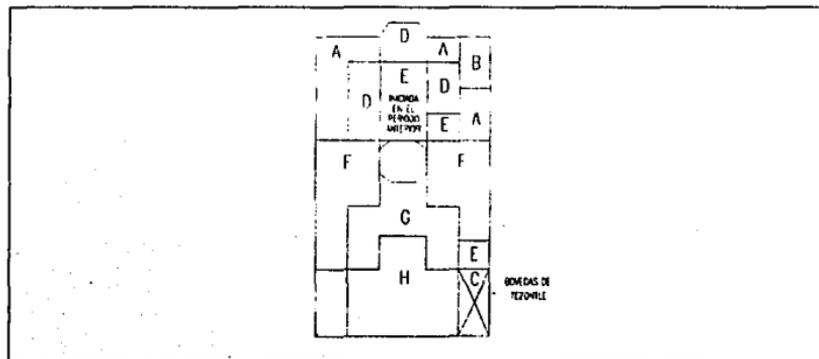


figura 2.3

PERIODO	
A	1575 - 1615
B	1615 - 1623
C	1624 - 1627
D	1635 - 1640
E	1642 - 1668
F	1653 - 1660
G	1660 - 1664
H	1664 - 1667

Se sabe que la Catedral se encuentra sobre restos de construcciones aztecas, que en su tiempo fueron demolidas y expandidas sobre el área que iba a ocupar la Catedral.

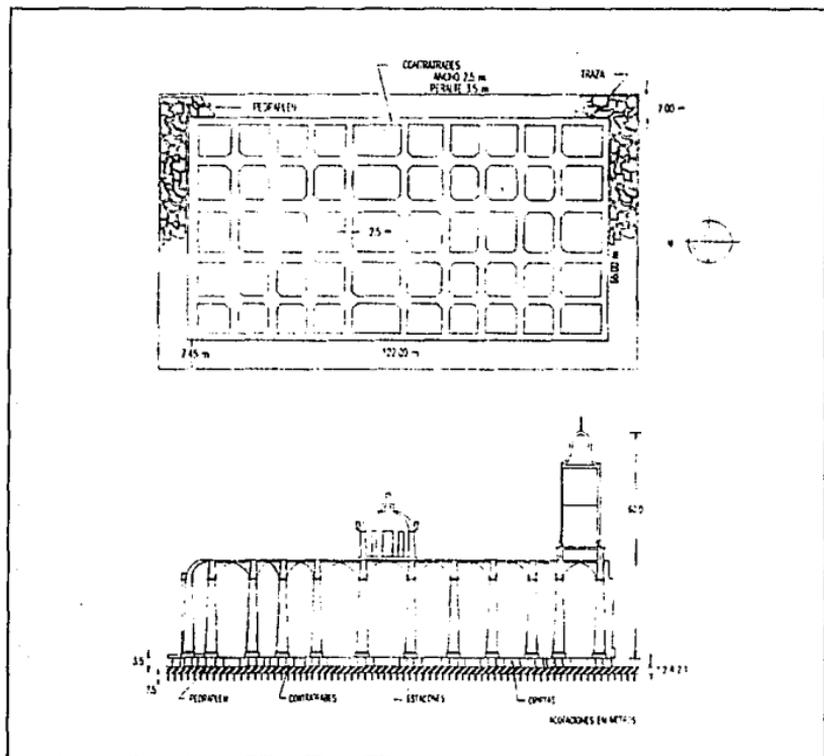


figura 2.4

	DESCRIPCION
PEDRAPLEN	De excelente calidad, con roca basáltica y tezontle y mortero de cal, arcilla y arena con espesor de 1.2 a 2.1 m.
ESTACONES	Troncos hincados de 22 a 30 cm de diámetro y 3.0 a 3.5 m de longitud, colocado en retícula de 45 a 60 cm de lado.
CONTRATABES DE MAMPOSTERIA	Reticula de elementos que unen las columnas y muros, tienen 3.5 m de peralte y 2.5 m de ancho.

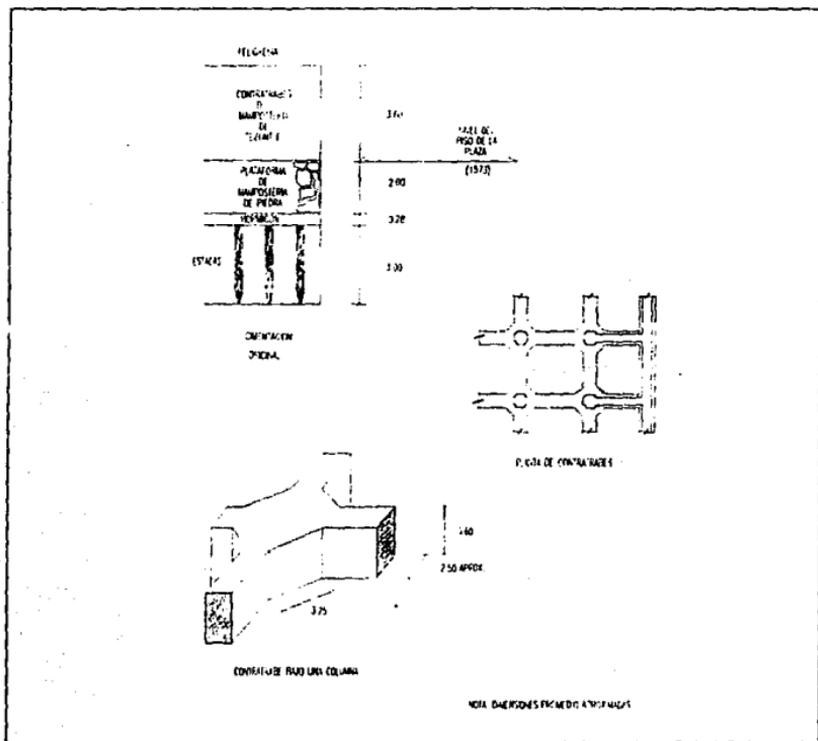


figura 2.5

SAGRARIO:

Construido entre 1749 y 1763, su planta es casi cuadrada de 47.20 m X 47.70 m; su peso es de aproximadamente 22,500 ton y la presión que transmite al subsuelo es de orden de 10.0 ton/m². Consta de una bóveda en forma de cruz griega; su cimentación esta constituida por un pedraplén de 1.20 m de espesor, que en su parte poniente se apoya sobre el Pedraplén de la Catedral, el resto del pedraplén del Sagrario se apoya sobre una firme de 30 cm de espesor que sirve de cabezal a una retícula de pilotes de madera de 8 a 12 cm de diámetro y de 1.8 a 2 m de longitud, espaciados de 1 a 2 m (figura 2.6).

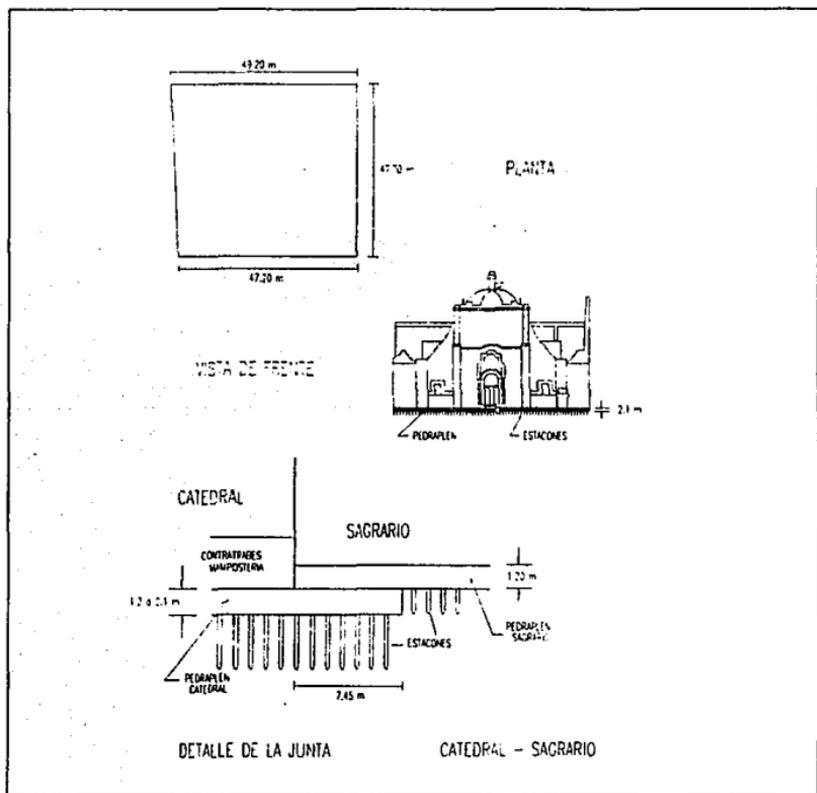


figura 2.6

2.3.- RECIMENTACIONES

1942

CATEDRAL:

La Comisión Técnica de la Catedral y el Sagrario encargo al Arq. Manuel Ortiz Monasterio el estudio de la cimentación de la Catedral; el cual realizó en forma general un estudio sobre las contratraves de mampostería; llegando a las siguientes recomendaciones:

- Retirar el piso de madera existente del nivel de feligresía.
- Retirar el relleno de tierra existente entre las contratraves y la cara superior del pedraplén (vaciado de las celdas).
- Colocar un refuerzo sobre el pedraplén, consistente en una losa de concreto reforzado de 52 cm, cuyo refuerzo se constituyó con perfiles de acero estructural de 42 cm de peralte, debidamente empotrada en las traves de mampostería.
- Construir un refuerzo en la cara superior de las traves de mampostería mediante cuatro traves de acero reforzadas con placas de acero, a fin de dar paso a través de ellas.
- Construir una losa de concreto para dar el piso de la feligresía (figura 2.7).

En el estudio se indica que los trabajos se realicen por franjas de 1.0 m a 1.5 m de ancho, teniendo el cuidado de ademar la excavación a medida que se progresa en la misma.

Según el Arq. Manuel Ortiz Monasterio, disminuyó el esfuerzo medio de cimentación de 14.3 a 10.8 l/m^2 ; esto representa un decremento de un 25% aproximadamente.

Esta recimentación se proyectó en 1929, pero se realizó hasta los años 40; se sabe que en 1942 se trabajaba con toda intensidad.

En primer término fue demoler en 1938 lo que había sido el edificio del seminario, con el propósito de descargar la zona oriente.

En el área que ocupaba el relleno de tierra entre las contratraves se aprovechó para instalar pesados anaqueles de concreto formando las criptas, cuyo número actual es de unas 9,200 y llegarán a ser más de 10,000. Además, se abrieron pasos en todas las contratraves de mampostería, para el acceso a las celdas, constituyendo así las actuales pasillos del sótano de la Catedral.

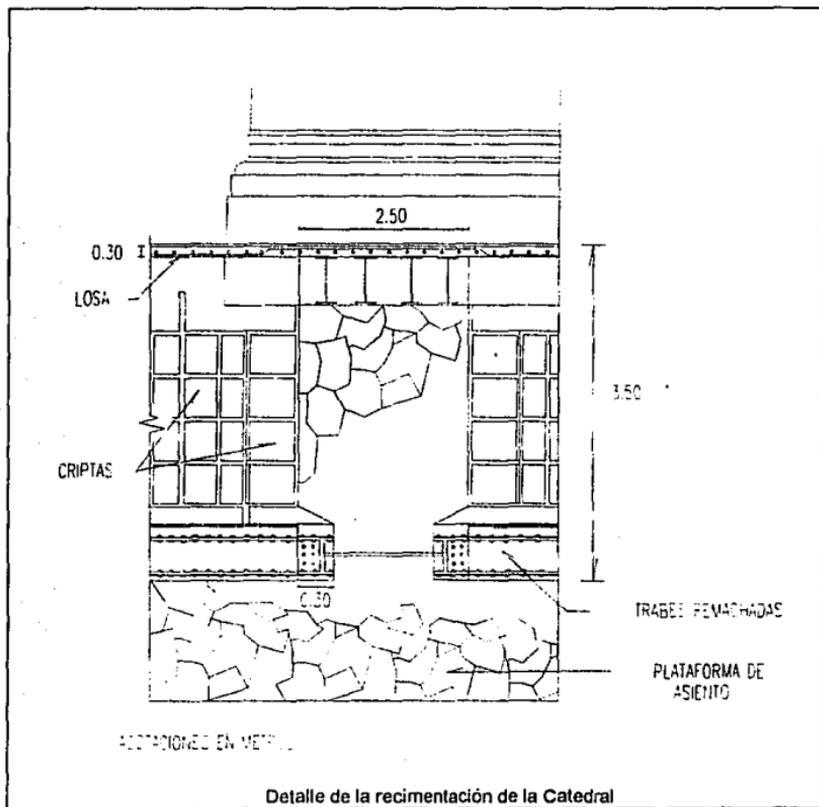


figura 2.7

SAGRARIO:

En la década de 1940 se intentó recimentar el Sagrario mediante pilotes de madera de 25 cm de diámetro; para protegerlos de la alteración y efectos del cambio de posición del nivel freático, los 2 a 3 metros superiores se fabricaron de concreto de sección cuadrada. Así mismo se reforzó el piso de la feligresía con una losa de concreto soportada en una reticular de traveses de acero.

El tramo superior de estos pilotes puede observarse en las celdas de cimentación construidas en 1975, llama la atención que algunas de las juntas entre madera y concreto muestren una gran deformación horizontal, quedando la incertidumbre de si este pandeo se produjo durante el hincado o posteriormente por los asentamientos.

En cuanto a la profundidad y ubicación de los pilotes de madera y concreto (*no se dispone de información precisa*).

Posteriormente por los años de 1940 y 1960 se intentó otro proceso de recimentación, se hincaron pilotes circulares, demostrando que se tuvieron dificultades durante el hincado, pero no se precisa cuantos lograron hincarse realmente.

CATEDRAL:

A partir de 1972 la Secretaría de Patrimonio Nacional (SPN) llevó a cabo un estudio estructural y geotécnico, que implicó una campaña de cuatro Sondeos Mixtos, alrededor de la Catedral y Sagrario, llegando a una profundidad de 40.5 m.

La SPN soló precisa que la capacidad de los pilotes de punta apoyados en la capa dura a 38 m de profundidad, con diámetros de 35, 40 y 45 cm, y sería de 50, 72 y 90 ton respectivamente. (No se aclara el criterio que se siguió para definir el número de pilotes, su distribución y la influencia en la fricción negativa).

En el estudio de la SPN recomienda la instalación de 280 pilotes apoyados en la capa dura a 38 m localizados en el interior del templo y distribuidos con mayor densidad en la parte Sur.

Se afirma que:

- a) Los pilotes de control reducirán el trabajo de la cimentación original en un 25 %.
- b) Permitirían ajustar el descenso de los edificios respecto al terreno circundante y.
- c) Uniformizarían los hundimientos diferenciales dentro de las mismas estructuras.

Los trabajos de recimentación de la Catedral y el Sagrario se realizaron entre febrero de 1975 y Octubre de 1976.

Las dificultades que se presentaron para instalar los pilotes (pedraplén de mampostería, los estacones de madera y la costra natural superficial, la estructura misma y ornamentos religiosos) obligaron a modificar el proyecto, colocándolos donde fue posible, este no fue documentado, ni el por qué se incrementó a 387 el número de Pilotes.

Se decidió excavar manualmente lumbreras de acceso.

Se le llamo Núcleo de Pilotes a los grupos de pilotes instalados en una misma lumbrera (forma cuadrada, rectangular o pentágonal).

Se muestran la distribución original de pilotes; su ubicación de los 387 pilotes que fueron hincados con diámetros de 40 y 45 cm y en tramos de 90 cm (figura 2.8).

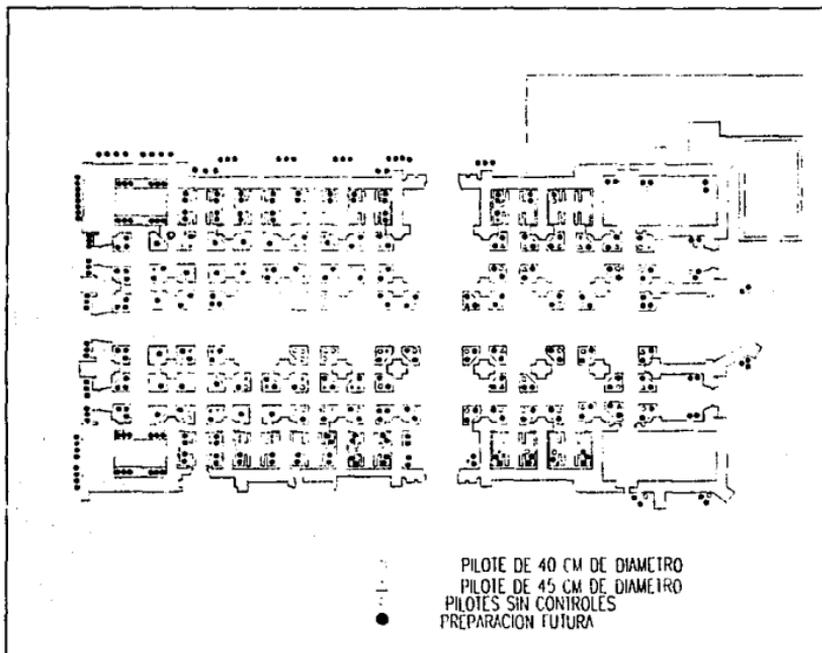


figura 2.8

TIPO DE PILOTE:

El tipo de Pilote que se utilizó fue de segmentos precolados de concreto reforzado de 250 kg/cm^2 de resistencia a la compresión, en tramos precolados de 90 cm y en diámetros de 40 y 45 cm. El acero de refuerzo se colocó en un paquete central con muy pobre continuidad.

HINCADO DE PILOTES:

El hincado de pilotes se hizo a presión, mediante gastos hidráulicos.

CRONOLOGÍA DE LA CIMENTACIÓN

ACTIVIDAD	INICIO	TERMINACIÓN
EXCAVACIÓN DE LUMBRERA Y COLADO DE ADEMÉS DE LOS 160 NÚCLEOS.	Feb. 1975	Ago. 1976
COLADO DE LOS DADOS DE ANCLAJE DE LOS PILOTES.	Sept. 1975	Ago. 1976
HINCADO DE 368 PILOTES BAJO UNA CARGA DE 100 TON.	Sept. 1975	Jun. 1976
COLOCACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL A 383 PILOTES.	Sept. 1975	Sept. 1976

SAGRARIO:

Para llevarse a cabo el hincado de pilotes se procedió a efectuar una excavación por debajo del Pedraplén, recibéndolo con traveses y columnas de concreto reforzado a medida que avanzaban los frentes de excavación constituyendo una estructura de soporte para todo el pedraplén y el Sagrario. La profundidad de la excavación varió entre 5.50 y 8 m por debajo del piso de la feligresía; a estas profundidades se procedió a armar un sistema de losas y traveses que, actuarían como una losa de cimentación que contendría los dados de anclaje de los pilotes de control.

Se construyeron 20 tableros para formar la losa de cimentación de concreto reforzado de 30 a 60 cm de peralte. Prácticamente cubre todo el área del Sagrario (figura 2.9).

La losa en su conjunto está a su vez reforzada con traveses de 80 a 180 cm de peralte.

EL HINCADO DE PILOTES:

Fue a presión mediante gatos hidráulicos La distribución final de los 129 pilotes que fueron hincados en tramos de 90 cm, con diámetros de 40 y 45 cm.

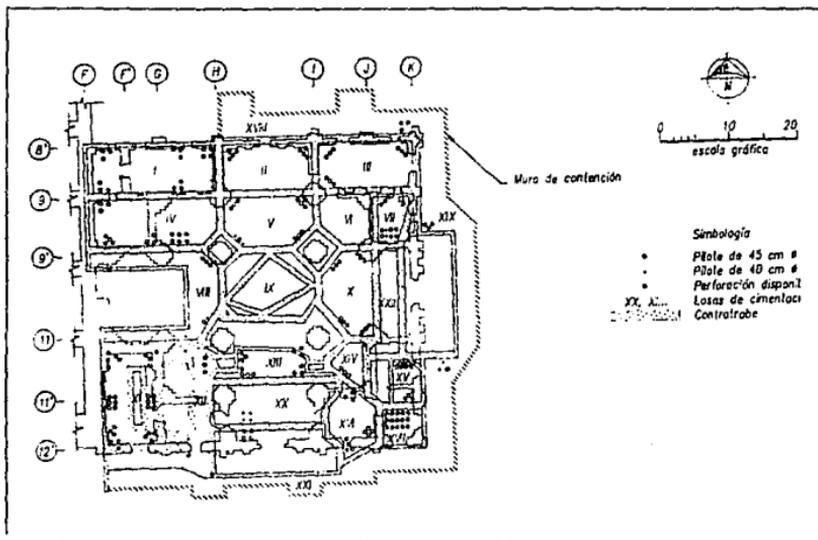


figura 2.9

Capítulo 3

ESTRATIGRAFIA DE LA ZONA DE LA CATEDRAL

3.1.- Trabajos de campo y laboratorio

3.2.- Estratigrafía del sitio

3.3.- Niveles piezométricos

ESTRATIGRAFIA DE LA ZONA DE LA CATEDRAL

Esta zona se caracteriza por los grandes espesores de arcilla blandas de alta compresibilidad, que subyacen a una costra endurecida superficial de espesor variable en cada sitio, dependiendo de la localización e historia de cargas; esto provoca que en esta zona se encuentren las siguientes condiciones extremas.

- Arcillas fuertemente consolidadas por efecto de rellenos y grandes sobrecargas de construcciones aztecas y coloniales.
- Arcillas blandas, asociadas a lugares que han alojado plazas y jardines durante largos periodos de tiempo.
- Arcillas muy blandas en los cruces de antiguos canales.

El intenso bombeo para abastecer de agua a la Ciudad de México se refleja en el aumento general, de la resistencia de los estratos de arcilla por efecto de la consolidación inducida.

3.1.- TRABAJOS DE CAMPO Y LABORATORIO

Considerando que las propiedades mecánicas del Subsuelo de la zona de la Catedral han cambiado con el tiempo, por las causas de las sobrecargas y condiciones de bombeo a que ha estado sometido y que los sondeos y mediciones piezométricas disponibles datan de 1972, se hizo necesario realizar una campaña de exploración para definir las condiciones actuales del subsuelo.

Mediciones hechas en Noviembre de 1989 por la empresa TGC.

Así mismo se impuso la necesidad de conocer la evolución del nivel freático y de las condiciones piezométricas ya que su variación con el tiempo se traduce en sobrecargas al subsuelo. Se realizó una campaña de exploración, muestreo e instrumentación consistente en la ejecución de:

- a) veintidós sondeos de cono eléctrico
- b) sondeos con muestreo inalterado continuo
- c) instalación de estaciones piezométricas

- d) tubos para observación del nivel freático
- e) bancos de nivel profundo, y la
- f) ejecución de los ensayos de laboratorio necesarios para definir las propiedades índice y mecánicas de los suelos.

3.2.- ESTRATIGRAFIA DEL SITIO

Se programó la ejecución de 22 sondeos de exploración de cono eléctrico, de los cuales se ubican 13 alrededor de la Catedral (1 al 13); además tres en el interior de la catedral (18,19 y 20), uno en el interior del Sagrario (21), uno en el interior del museo (22), uno en el templo mayor (14) y los tres restantes a lo largo del costado oriente de la Línea 2 del Metro, (figura 3.1).

Para definir con precisión los cambios de resistencia originados por la historia de cargas de cada punto estudiado, se justificó la conveniencia de profundizar los sondeos más allá de la capa dura.

LOCALIZACION DE LOS 22 SONDEOS

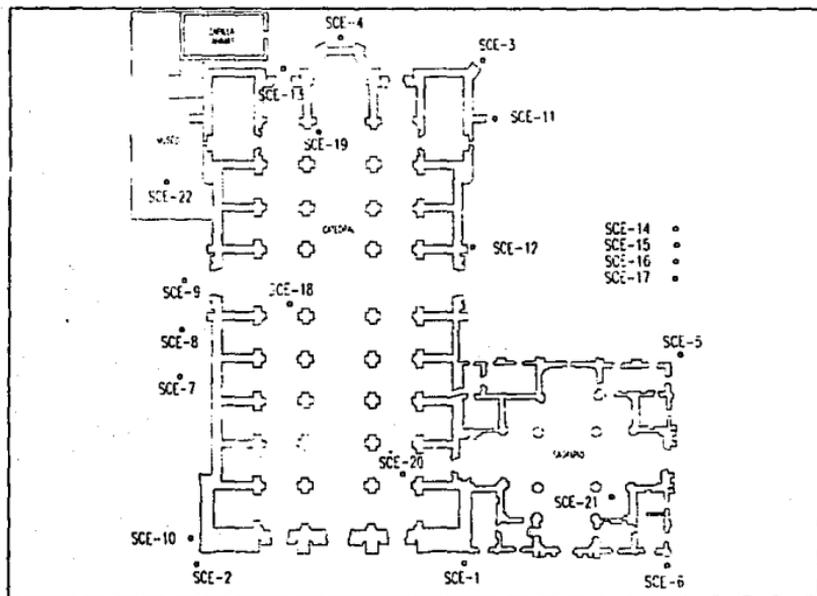


figura 3.1

En la tabla 3.1 se describe la profundidad de cada uno de los sondeos y una pequeña descripción del sitio.

SONDEO	PROFUNDIDAD	DESCRIPCIÓN
1	57.20	En el atrio sur, entre la Catedral y el Sagrario, en el punto que recibe mayor carga.
2	60.00	Esquina Sur-Poniente de la Catedral, por ser punto con mayor hundimiento.
3	38.50	Esquina Nor-Oriente de la Catedral.
4	38.60	Al Norte del ábside, representativo de la zona con menor hundimiento.
5	36.90	En una zona con sólo cargas de templos aztecas.
6	60.00	En la esquina Sur-Oriente del Sagrario, por ser otro punto con hundimiento considerable.
7	60.20	En el atrio Poniente de la Catedral, considerándolo representativo de zona.
8	41.10	En el atrio Poniente de la Catedral, para realizar pruebas de carga estática con el cono, en la capa dura.
9	43.50	En el atrio Poniente de la Catedral, para realizar pruebas de carga estática con el cono, en la capa dura.
10	48.00	En la esquina Sur-Oeste de la Catedral, para realizar pruebas de carga estática con el cono, en la capa dura.
11	44.00	En el atrio Poniente de la Catedral, para realizar pruebas de carga estática con el cono, en la capa dura.
12	45.00	En el atrio Oriente de la Catedral, para realizar pruebas de carga estática con el cono, en la capa dura.
13	45.00	En el atrio Norte, al oeste del ábside, para realizar pruebas de carga estática con el cono, en la capa dura.
14	54.00	En la esquina Sur-Este del Templo Mayor, se realizaron pruebas de carga estática con el cono, en la capa dura.
15	46.50	Al Oriente de la Línea 2 del Metro.
16	45.00	Al Oriente de la Línea 2 del Metro.
17	45.00	Al Oriente de la Línea 2 del Metro.
18	45.00	Contiguo a la columna C7, en el interior de la Catedral.
19	45.00	Contiguo a la Columna C3, en el interior de la Catedral.
20	45.00	Contiguo a la columna E11, en el interior de la Catedral.
21	45.00	Interior del Sagrario.
22	45.00	En el patio interior del Museo.

tabla 3.1

En la figura 3.2 se integran los sondeos del cono (1 al 13), para mostrar las características del subsuelo bajo la Catedral; también se muestra las variaciones de profundidad descritas, y en la tabla 3.2 se anotan los espesores y profundidades más significativos de la secuencia estratigráfica.

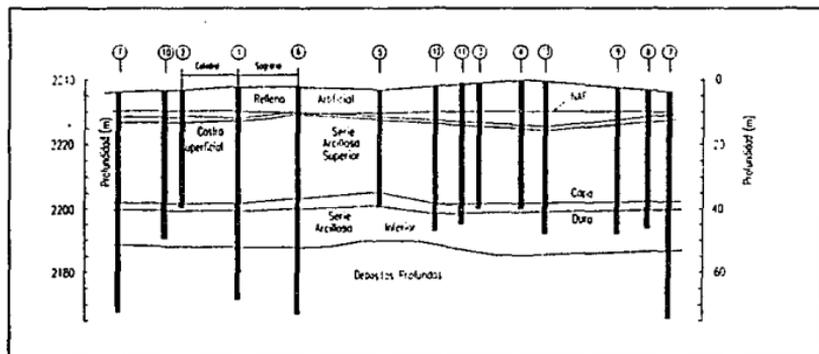


figura 3.2

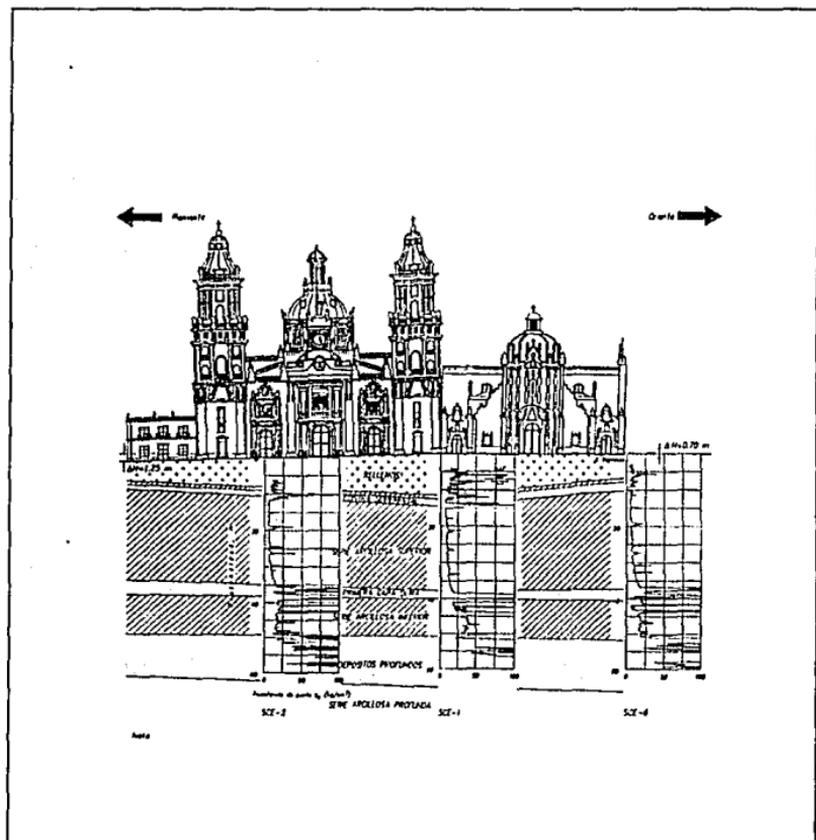
		SONDEOS DE CONO ELÉCTRICO						
Prof. (m)		SCE-7	SCE-2	SCE-1	SCE-6	SCE-5	SCE-3	SCE-4
ESPE- SOR (m)	RA	8.11	9.0	12.6	6.5	8.1	10.7	13.6
	CS	3.0	1.6	2.0	2.4	2.4	2.0	2.5
	SAS	23.4	24.2	23.2	27.2	23.7	25.0	21.8
	CD	2.3	3.4	2.3	3.2	-	-	-
	SAI	11.0	11.0	10.7	11.3	-	-	-
PRO- FUN- DIDAD (m)	EM	18.8	19.0	21.0	19.2	18.8	20.8	23.6
	CD	35.5	35.6	38.5	36.7	34.1	38.4	38.4
	DP	50.0	50.0	51.5	51.2	-	-	-
	NF	5.3	6.5	7.5	7.6	7.7	-	8.8
Cota brocal		2233.03	2233.07	2234.27	2234.02	2234.02	2234.79	2235.61

SÍMBOLO	ESTRATO	PROFUNDIDAD MEDIA (m)	ESPESOR MEDIO (m)
RA	Releño artificial	0 - 11.1	11.1 ± 2.2
CS	Costra superficial	11.1 - 13.0	1.9 ± 0.3
SAS	Serie arcillosa superior	13.0 - 36.7	23.7 ± 1.1
CD	Capa dura	36.7 - 39.9	3.2 ± 0.4
SAI	Serie arcillosa inferior	39.9 - 50.5	10.6 ± 0.4
EM	Estrato marcador	20.2 ± 1.6	-
DP	Depósitos profundos	50.5 ± 0.7	-
NF	Nivel freático	7.2 ± 1.1	-

tabla 3.2

Detalle:

Se presentan tres sondeos ubicados al frente de la catedral, para facilitar la comprensión del conjunto



Nota: En la estratigrafía del terreno se ve claramente como en el centro se presenta mayor resistencia del suelo y menor hacia los lados; esto puede explicar que la Catedral se incline hacia el poniente y el Sagrario hacia el oriente.

3.3.- NIVELES PIEZOMETRICOS

Con base a la estratigrafía antes descrita se eligieron las profundidades de los lentes permeables a los que deberían instalarse las puntas piezométricas para definir la posición del nivel freático y niveles piezométricos en el área de estudio.

Por este motivo se instalaron estaciones de medición, una al lado de cada sondeo, en:

- la periferia de la Catedral
- costado oriente de la Línea 2 del Metro
- templo mayor

La configuración del nivel freático se muestra mediante curvas de nivel cuyos valores están dados en cotas referidas al banco de nivel profundo emplazado en el patio de emperatriz en Palacio Nacional,

Es interesante mencionar que el estudio del flujo con trazadores que se hizo en 1940, demostró que había cierto flujo transversal de poniente a oriente.

Se observa una tendencia a establecer un flujo hacia el sur, es decir, hacia el colector semiprofundo 5 de Mayo (funciona como dren, en su cercanía las curvas de nivel se abaten) y otro flujo con tendencia a la Línea 2 del Metro, hacia el Norte y hacia el Este, probablemente influido por los carcamos de bombeo instalados en el Templo Mayor (figura 3.3).

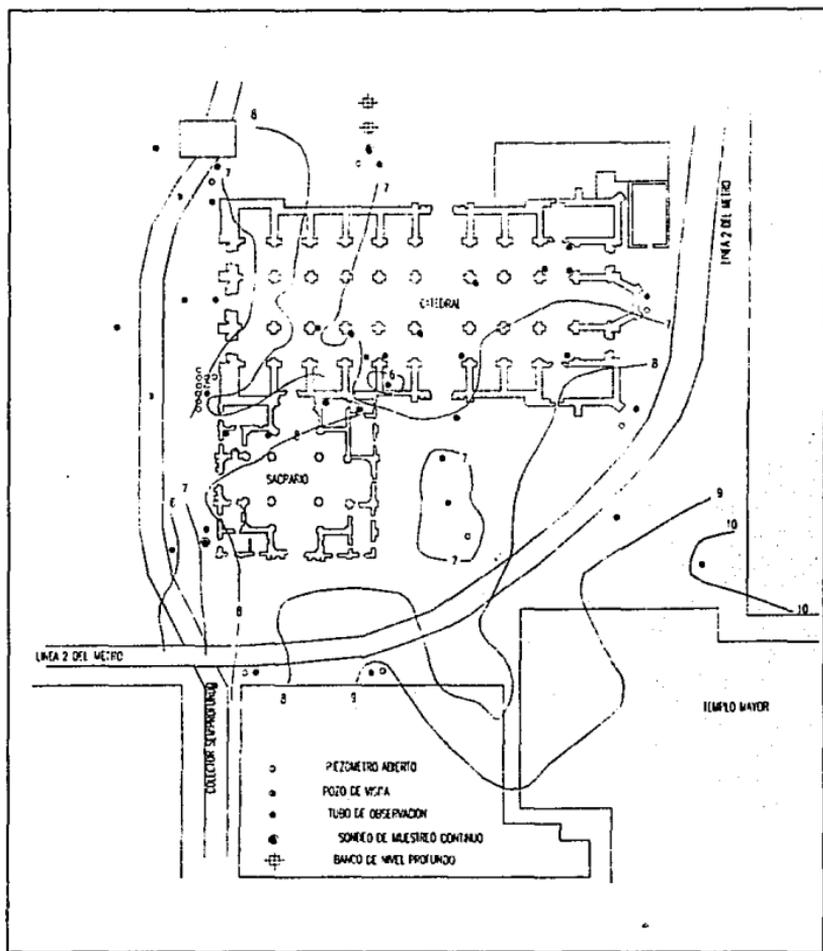
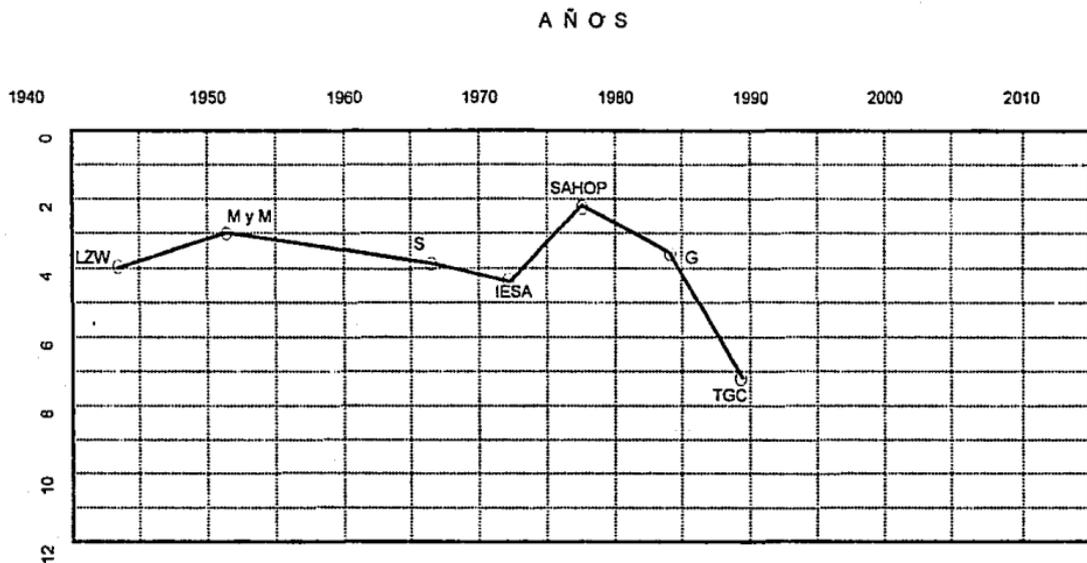


figura 3.3

Otro aspecto de importancia fundamental es el constante abatimiento que esta ocurriendo en el nivel freático con el tiempo. Se sabe que su posición en 1953 era de 2.8 m y que actualmente es de 7.2 m (figura 3.4).

P
R
C
F
·
D
E
L
N
I
V
E
L
F
R
E
A
T
I
C
O

figura 3.4



LZW: Dr. Leonardo zeevaert Wiechers
 MyM: Prof. R. Marsal y Mazari
 S: Solum, S. A.

IESA: Ingenieria Experimental, S. A.
 SAHOP: Sria. de Asentamientos Humanos y Obras Públicas
 G: Geotec, S. A.
 TGC: TGC, Geotecnia, S. A.

EVOLUCION DEL NIVEL FREATICO

Capítulo 4

ASENTAMIENTOS Y POSIBILIDADES DE CORRECCION

- 4.1.- Análisis de causas que alteran al terreno*
- 4.2.- Evolucion de los fundimientos de la Catedral*
- 4.3.- Evolucion de los fundimientos del Sagrario*
- 4.4.- Posibilidades de correccion al comportamiento de las cimentaciones*

4.1.- ANALISIS DE CAUSAS QUE ALTERAN AL TERRENO

Debido que en la Ciudad de México se han construido obras por más de 2000 años, desde las edificaciones de Teotihuacan, las religiosas, civiles y las obras de desagüe de la colonia, hasta los tuneles y estructuras modernas; no se había hecho un estudio del hundimiento en la Ciudad de México hasta aproximadamente en la década de los 40 y 50's que se llevarón a cabo estudios sobre las propiedades mecánicas de los suelos del valle, motivados estos estudios por la aceleración del hundimiento del Valle de México.

A continuación se presentan para análisis 8 puntos que pueden ser las causas que alteran al terreno del Valle de México.

1.- Descenso general del nivel del Valle de México.

- Contracciones debidas a transformaciones geológicas
- Pérdida de agua, por extracción en pozos
- Heterogéneo del suelo

2.- Obras de drenaje y desagüe de la Ciudad de México

- Colector semi-profundo.
- Obras de desagüe y drenaje que han desecado las capas superficiales del terreno disminuyendo su capacidad de resistencia y provoca rápidos asentamientos desiguales.

3.- Corrientes subterráneas de agua (corre de SO a NE)

- Arrastre de aguas freáticas

4.- Naturaleza del terreno

- Terreno de desigual compresibilidad

5.- Desequilibrio en la distribución de masas de la construcción

6.- Temblores

- 19 de Junio de 1858
- 2 de Noviembre de 1894 y 1895
- 28 de Julio de 1957
- 19 y 20 de Septiembre de 1985

CONCLUSIÓN:

Después del análisis de las 6 posibles causas solo podemos mencionar 3 como verdaderas causas del hundimiento de la Catedral:

- Descenso general del nivel del Valle de México
- Naturaleza del terreno
- Desequilibrio en la distribución de masas en la construcción
- Obras de drenaje y desagüe en la Ciudad de México

4.2.- EVOLUCION DE LOS HUNDIMIENTOS DE LA CATEDRAL

CATEDRAL

1.- Durante la Construcción (1536 - 1672).

Desde la colocación del Pedraplén sobre la retícula de estacones, estos asentamientos fueron debidos a la magnitud de la carga y a la compresibilidad natural de las arcillas del Valle de México; el fenómeno se hizo significativo al levantar los muros de mampostería de tezontle. Para 1615 todos los muros estaban a más de la mitad de su altura, en 1642 se inició la construcción de las torres y el revestimiento de la fachada con cantera, para 1656 y 1667 se completa la fachada, para esta fecha era de 80 cm, los asentamientos diferenciales que ocurrieron durante los primeros 131 años de la Catedral se explica de la siguiente manera.

- a) Los hundimientos que ocurrieron con el Pedraplén no generaron problemas porque se fueron disimulando durante la ejecución de la obra.
- b) Para 1645 la carga aplicada era del orden del 60% del peso total y provocó el hundimiento diferencial de 80 cm entre las torres, de oriente a poniente, lo que define una velocidad de deformación diferencial de 2.67 mm/mes.

2.- Entre 1672 y 1907.

Durante este periodo de 235 años la Catedral se hundió bajo su propio peso, las deformaciones diferenciales acumuladas se originan por la variación de compresibilidad de las arcillas, consecuencia a su vez de la preconsolidación inducida en las áreas ocupadas por las construcciones aztecas; y para 1907 el asentamiento diferencial entre el presbiterio y la torre poniente era de 1.53 m, lo que corresponde a una velocidad de deformación de 0.25 mm/mes, esta velocidad es un décimo de la que se tenía al final de la construcción y por ello, seguramente define la etapa de consolidación secundaria bajo las cargas originales.

3.- Entre 1907 y 1927.

Durante este período la velocidad de hundimiento diferencial se incrementó a 0.4 mm/mes al aumentar en la segunda mitad del siglo pasado la perforación de pozos, que inicialmente fueron artesianos y para la década de los 20 ya requirieron extracción por bombeo.

4.- Entre 1927 y 1956.

- Efectos del bombeo profundo:

Los asentamientos diferenciales se aceleraron notablemente a consecuencia del bombeo profundo, con velocidades de deformación que variaron entre 0.80 y 2.60 mm/mes, estos valores se definieron con las configuraciones de 1927 y 1934, así como la diferencial de 1953 a 1955.

- Primera recimentación:

Las mediciones topográficas son tan escasas que no se puede precisar el comportamiento logrado.

- Hundimiento regional:

Durante los años 1938 y 1956 el hundimiento regional llegó a alcanzar una velocidad de deformación vertical de 33.3 mm/mes, debido a esto en 1956 el hundimiento total en la torre poniente llegó a 5.20 m.

5.- Entre 1956 y 1967.

Durante estos años se redujo la velocidad de hundimiento regional porque se estableció una veda en la apertura de nuevos pozos de bombeo profundo. A pesar de ello, la estructura continuó sufriendo el proceso de asentamiento diferencial con una velocidad de 0.8 mm/mes.

6.- Entre 1967 y 1978.

Durante este período el conjunto resistió la influencia de grandes obras que se construyeron alrededor y sobre todo, de su segunda recimentación

- Construcción del Metro:

Se ubica en el lado Oriente y Norte de la Catedral, se opero un sistema de Bombeo que abatió el nivel freatico unos 15 m durante seis meses, luego el cajón genero en cierto abatimiento constante ya que numerosas juntas verticales de los muros favorecen el flujo del agua hacia el interior del cajón.

- Colector semi-profundo:

El colector de 3 m de diámetro sale de la calle 5 de Mayo, pasa por el frente de los Templos y continua por la calle de la Moneda. Tiene dos tramos en curva para librar el Atrio; su profundidad, es del orden de 15 m. Esta estructura produjo abatimiento local del nivel freatico durante su construcción en 1957.

- Segunda recimentacion:

El Ing. Gonzalez Flores, consideraba que los pilotes de control se debían diseñar para resistir solo una parte de la carga aplicada a la cimentación y que era posible controlar las asentamientos de la estructura haciendo que esta siga el terreno circundante a la misma velocidad que el hundimiento regional; decía que sí "La estructura no emergería, ni se hundiría respecto al terreno". este comportamiento es factible si el hundimiento regional es uniforme dentro del área ocupada por la cimentación, pero si este no es el caso, la estructura se deformara, siguiendo el hundimiento regional diferencial. por ello, este fenómeno seguira dañando a la Catedral y al Sagrario, pues el conjunto de pilotes de control solo fue de modificar temporalmente la velocidad de hundimiento de las estructuras.

- Hundimientos inducidos:

El bombeo profundo combinado con el bombeo somero del colector semi-profundo y la Línea 2 del Metro, aceleraron el hundimiento a velocidades de deformación diferencial de 2.6 mm/mes, por lo tanto, los trabajos de recimentación incrementaron la deformación diferencial en 20 cm, lo cual significa una velocidad de deformaciones de 9.1 mm/mes.

- Operación inicial de los pilotes:

Considerando que la recimentación se completo en Noviembre de 1976, el asentamiento de 7 mm medido 6 meses después, se puede indicar como primer indicador de la limitación de los pilotes para controlar los hundimientos de la estructura, ya que define una velocidad de deformación de 1.2 mm/mes, valor que resulta mayor que los 0.80 mm/mes previos a la recimentación.

7.- Entre 1978 Y 1989.

Entre mediados de 1978 y enero de 1989 la velocidad de deformación diferencial fue de 0.2 mm/mes, valor que resulta pequeña cuando se le compara con la velocidad de deformación regional que vario entre 4.2 y 8.8 mm/mes; por ello la deformación diferencial seguramente es imprecisa; hasta Noviembre de 1989, valiéndose de las nivelaciones de Enero y Noviembre de 1989, la primera obtenida con datos de la empresa PICOSA y la segunda definida por la empresa HIPLAC, resulta alarmante la velocidad de deformación diferencial de 2.7 mm/mes. Es importante resaltar que durante el presente siglo, el hundimiento diferencial ha sido del orden del 16 % del hundimiento regional.

4.3.- EVOLUCION DE LOS HUNDIMIENTOS DEL SAGRARIO

SAGRARIO

Asentamiento:

Con referencia de cero la columna central entre el periodo de 1983, 1989 solo no se pudo obtener una correlación con la Catedral. En 1972 acusaba un diferencial máximo de 70 cm.

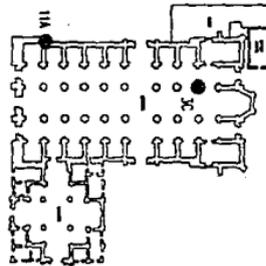
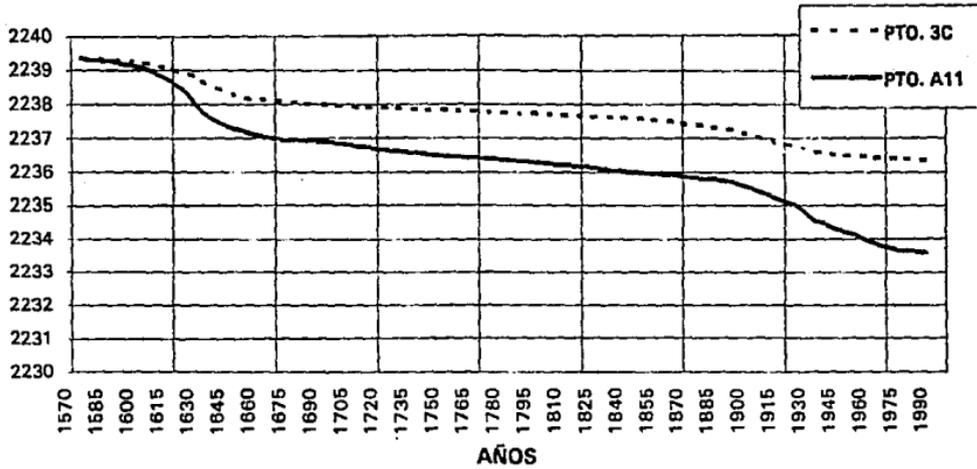
Velocidade de deformación :

No se tiene un patrón de comportamiento con algún orden geométrico; solo se puede aclarar que las velocidades de deformación varían entre 0 y 2.9 mm/mes.

Consecuencias

Agrietamiento de Pisos y desplome de Columnas y Pilastras.

HUNDIMIENTOS ENTRE LOS PUNTOS 3C Y A11



4.4.- POSIBILIDADES DE CORRECCION AL COMPORTAMIENTO DE LAS CIMENTACIONES

ASPECTOS SIGNIFICATIVOS

El estado actual de la cimentación de La Catedral Metropolitana y el Sagrario muestran asentamientos diferenciales notables que han generado desplomes importantes y agrietamientos de diferentes elementos de la estructura.

La zona de mayor asentamiento se encuentra en la torre poniente de la Catedral, que ha acumulado, desde su construcción a la fecha, un desnivel de 2.4 m con respecto a la zona del ábside y de 1.4 m respecto a la torre oriente. El Sagrario muestra un desnivel de 0.90 m hacia el oriente.

La tabla 1 muestra las 4 alternativas técnicamente viables, analizadas comparativamente en detalle, con el fin de elegir la mas adecuada. Estas alternativas son:

1.- Pilotes de fricción negativa

La instalación de un conjunto de pilotes adicionales al actual, apoyando su punta en la primera capa dura y permitiendo que la cabeza quede a 2 m bajo la losa del piso de criplas, deslizados de la losa por un tapon de arcilla blanda, permitirá que el conjunto de pilotes sea capaz de tomar, por fricción negativa la carga total de la subestructura aumentada del peso del suelo que rodea a los pilotes.

El objeto de esta solución es formar un gran bloque de "Suelo Reforzado" por pilotes capaces de impedir que la Catedral continúe hundíendose con la ciudad.

El proceso constructivo mas recomendable para los nuevos pilotes es el de "Colado en perforación previa" estabilizada por una suspensión coloidal de bentonita. Este procedimiento requiere solamente de un mínimo de equipos con motor eléctrico, formados por perforadoras, bombas para bentonita y mortero de cemento y malacates ligeros; el equipo puede operar desde el piso de feligresía o desde el piso de criptas en las áreas que estan bajo el coro de las capillas. De esta forma la interferencia con la estructura y la actividad del templo son mínimas.

2.- Pilas a la primera capa dura

La instalación de unas 240 pilas oblongas, con 1.5 m² de área transversal apoyadas en la primera capa dura y localizadas junto a la base de las columnas, pilastras y muros y provistas de un puente ajustable, fijo a la cabeza de la pila y a la estructura de cimentación, permitiría tomar la totalidad de la carga de la superestructura y cimentación, independizándola de los movimientos diferenciales del terreno de apoyo. La operación periódica de los puentes ajustables permitiría mover a voluntad el edificio, para adaptarlo a los hundimientos de suelo.

La liga de las pilas a la estructura requiere de reforzamiento local de la cimentación actual.

Mediante trabajos periodicos cada 2 o 3 años se ajustarían los puentes de carga para adaptar, de manera controlada, la cimentación al hundimiento regional; así, a través del tiempo se corregirían las deformaciones futuras y las actuales de donde se consideren necesario.

La construcción de las pilas requiere de equipo más voluminoso y de mayor potencia que solamente puede operar desde el piso de feligresía, lo que plantearía un problema importante en el área del coro y en algunas capillas.

Esta solución aprovecharía parte de los pilotes actuales.

3.- Pilas a los depositos profundos

Esta solución es semejante a la anterior, salvo que la profundidad de apoyo de la punta de las pilas sería de 52 m bajo la superficie, con el fin de alcanzar una mayor resistencia de los materiales arenosos de los depositos profundos, eliminando así la influencia de los hundimientos de la formación arcilla inferior.

A diferencia de la anterior solución, interfiere aun las criptas, requiere mayor reforzamiento a la estructura de cimentación y no aprovecha los pilotés actuales.

4.- Subexcavación

Esta técnica tiene como objeto corregir los desplomes de edificios que han sufrido hundimientos diferenciales, haciendo descender las partes altas con respecto a las bajas, mediante la extracción lenta y controlada del suelo en que se apoya la cimentación. Este objetivo se logrará haciendo perforaciones horizontales de pequeño diámetro, ejecutadas desde las lumbreras o zanjas que permitan acceso a los estratos del subsuelo desde los cuales debe extraerse el material bajo el apoyo de las zapatas, muro o losa.

En el caso particular de la Catedral, las zonas altas se encuentran en el área del altar mayor y de la torre oriente, donde se construirán lumbreras circulares, hasta la profundidad de 2 m bajo el contacto de la costra superficial con las arcillas lacustres, en las cuales deben de hacerse las perforaciones horizontales o inclinadas en direcciones radiales.

Las lumbreras quedarían revestidas de concreto lanzado para garantizar su permanencia, de manera que en el futuro puedan llevarse a cabo operaciones periódicas de nivelación del edificio; así, en una primera etapa, se corregirían, parcial o totalmente, los desniveles y desplomes actuales y en etapas posteriores, los que se vayan generando a causa del hundimiento diferencial futuro.

POSIBILIDADES DE SOLUCION AL COMPORTAMIENTO ACTUAL Y FUTURO

ALTERNATIVA	OBJETIVO	VENTAJAS	DESVENTAJAS
1.- PILOTES DE FRICCION NEGATIVA	<ol style="list-style-type: none"> 1.- Reducir asentamientos futuros 2.- Corregir desniveles y desplomes actuales y futuros 	<ol style="list-style-type: none"> 1.- Reduce asentamientos 2.- No interfiere con las criptas 3.- No modifica cimentación actual 4.- Aprovecha pilotes existentes 	<ol style="list-style-type: none"> 1.- Rehincado de pilotes 2.- Ocupa espacios interiores de feigresia 3.- Puede requerir subexcavación 4.- Emerge con el tiempo
2.- PILAS A LA PRIMERA CAPA DURA	<ol style="list-style-type: none"> 1.- Soporta carga total 2.- Reducir asentamientos diferenciales futuros 3.- Corregir desplomes y desniveles con controles 	<ol style="list-style-type: none"> 1.- Reduce asentamientos futuros 2.- Puede nivelarse 3.- No emerge 4.- Aprovecha pilotes existentes 	<ol style="list-style-type: none"> 1.- Rehincado de pilotes 2.- Refuerzo cimentación actual 3.- Ocupa espacios interiores de feigresia 4.- Requiere ajustes periódicos
3.- PILAS A DEPOSITOS PROFUNDOS	<ol style="list-style-type: none"> 1.- Soportar carga total 2.- Eliminar asentamientos futuros 3.- Corrección inicial de hundimientos y desplomes 	<ol style="list-style-type: none"> 1.- Elimina asentamientos futuros 2.- Puede nivelarse con controles 3.- No emerge 	<ol style="list-style-type: none"> 1.- Si interfiere con criptas 2.- Necesario reforzamiento mayor de la cimentación actual 3.- Requiere mantenimiento periódico
4. SUBEXCAVACION	<ol style="list-style-type: none"> 1.- Corregir desniveles y desplomes actuales y futuros 	<ol style="list-style-type: none"> 1.- No requiere modificar la cimentación actual 2.- Controla hundimientos 3.- No emerge 4.- Economía 	<ol style="list-style-type: none"> 1.- Requiere mantenimiento periódico 2.- El tiempo requerido para llevar la estructura a un plano

tabla 4.1

Puede decirse que en cuanto al objetivo fundamental de proveer una solución que permita corregir los desniveles y desplomes actuales y futuros de la Catedral, cualquiera de las soluciones planteadas es aceptable; sin embargo, teniendo en cuenta el grado de dificultad en la ejecución, las modificaciones a la estructura de cimentación y a su forma de trabajo actual, la interferencia de las obras con el funcionamiento de la Catedral, la solución que se considera mas adecuada es la subexcavación.

Capítulo 5

ALTERNATIVAS POSIBLES PARA LA CONSTRUCCION DE LUMBRERAS

- 5.1.- Limitaciones en cuanto a la construcción de lumbreras*
- 5.2.- Técnicas para la construcción de lumbreras*
- 5.3.- Métodos para el abatimiento del agua en excavaciones*
- 5.4.- Análisis para la construcción de lumbreras y métodos para el control de agua en excavaciones enfocadas a las características de la zona de la Catedral*

5.1.- LIMITACIONES EN CUANTO A LA CONSTRUCCION DE LUMBRERAS

De acuerdo a las características que presenta la Catedral y el Sagrario, se pueden considerar varias limitaciones en cuanto a la construcción de lumbreras, por lo que hay que tomar en cuenta los siguientes factores en la solución de las alternativas de selección; en cuanto a la técnicas a seleccionar de lumbreras y sistemas de bombeo se refieren.

Espacio	Eficacia
Costo	Ruido
Tiempo	Problemas técnicos
Riesgos	
Posibilidad de realización en la Catedral y el Sagrario Metropolitanos.	Problemas asociados a la Iglesia: - El cierre de la Iglesia - Desubicación de ornamentos religiosos

5.2.- TECNICAS PARA LA CONSTRUCCION DE LUMBRERAS

Definición de lumbrera:

Son excavaciones verticales de sección rectangular o circular según las necesidades del proyecto, siendo las circulares las más comunes.

Se emplean para bajar equipo o introducir la maquinaria para la extracción del producto de la excavación del túnel con el que se comunican, así como la introducción de materiales de construcción necesarias para la terminación del revestimiento definitivo que constituirá las paredes del túnel o podrán ser utilizadas como respiraderos en túneles carreteros o ferroviarios.

La determinación de la forma de excavación de una lumbrera o tiro vertical, estará en función de la resistencia encontrada en los sondeos efectuados previamente al proyecto, mismo que podrá determinar cual será el más indicado para llevar a cabo la excavación, así como su ademe primario y definitivo, no poniendo en peligro la estabilidad de la lumbrera durante la ejecución.

TECNICA SOLUM

Técnica por perforación de segmentos anulares y sustitución del peso del volumen del núcleo por agua.

La técnica Solum consiste esencialmente en tres pasos:

- Se marca en el terreno el centro o los ejes de la lumbrera y las fronteras del revestimiento, se subdivide el área en seis partes iguales, subdividiendo cada una en ángulos de 60° y se procede a hacer perforaciones de 0.60 m de diámetro hasta la profundidad de proyecto en un sector anular.

Las perforaciones estarán separadas entre sí, 0.60 m aproximadamente, siempre dejando una parte del terreno de ese sector sin perforar (figura 5.1).

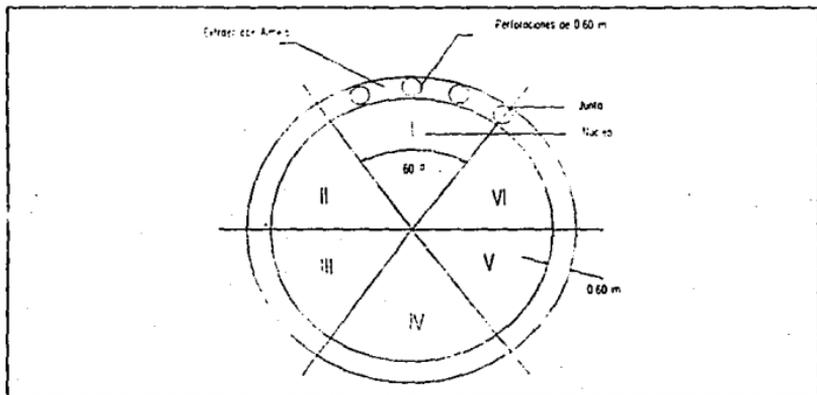


figura 5.1

Todas las perforaciones realizadas son estabilizadas con lodo bentonítico, una vez terminadas las perforaciones se procede a la extracción del material remanente entre cada perforación por medio de una draga con almeja substituyendo una vez más el material extraído por lodo bentonítico. Cuando se termina de excavar y ademar el primer sector anular, se procede al colado del mismo.

- b) Se baja el armado y se inyecta concreto desde el fondo, por medio de un tubo "tremie", el cual desplaza el lodo bentonítico por diferencia de densidades, así termina un ciclo de colado del sector anular. Se altera el procedimiento de excavación adomado y colado en el sector III, V, II, IV, y VI. (como se encuentran divididos en la figura 5.1) y así sucesivamente hasta la terminación del revestimiento de las paredes de la lumbrera.

Posteriormente se procede a la excavación con una draga con almeja hasta la profundidad de proyecto y que de acuerdo con los estudios de mecánica de suelos no presentarán expansiones a la descarga del suelo. Cuando se llega a este nivel, se suspenden los trabajos y se reemplaza el peso del material por un volumen equivalente de agua para evitar el bufamiento del subsuelo (figura 5.2-a).

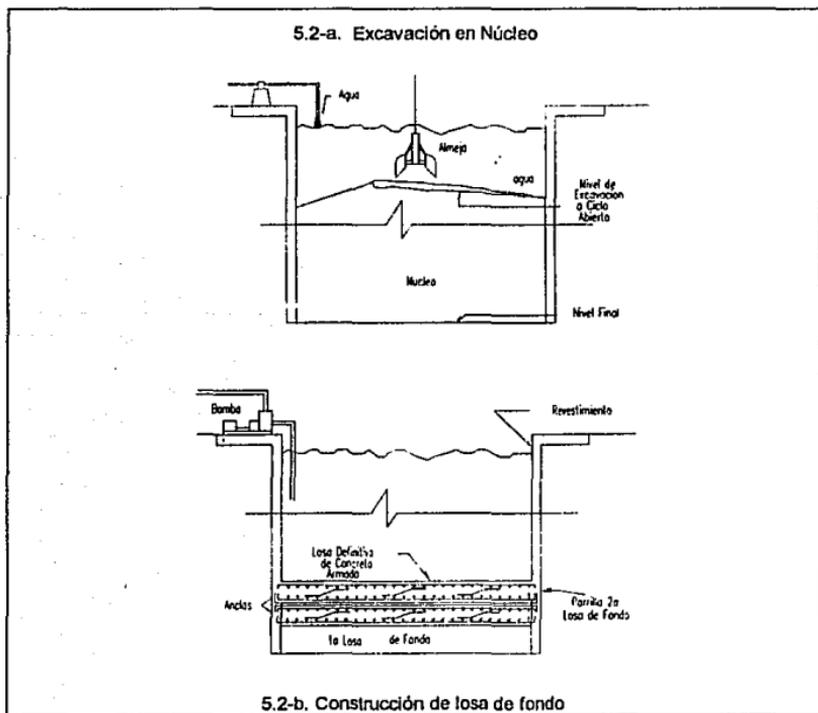


figura 2

Continuándose con la excavación del núcleo de la lumbrera, extrayendo el material bajo el agua hasta llegar a la profundidad deseada.

- c) Al terminar la excavación se procede inmediatamente a colar un fondo de concreto a forma de tapón o plantilla, dejándose fraguar. Posteriormente se limpia el azolve y se baja una parrilla de armado para colar un segundo fondo bajo el agua. Acto seguido se extrae el agua dentro de la excavación y se baja el personal para sellar (calafatear) el tapón de fondo y evitar la filtración de agua o algún otro material. Por último se procede a colar el fondo definitivo de concreto armado, perfectamente bien anclado a los muros del revestimiento de la lumbrera (figura 5.2-b).

TECNICA SOLETANCHE

Técnica de perforación rotatoria de circulación inversa

El proceso de construcción de lumbreras en arcillas, en esta técnica es muy similar a la anterior expuesta, con dos variantes:

- 1.- La excavación del sector anular, se efectúa por medio de un taladro barrenador guiado, colocándose en los brocales y montado sobre una vía por donde se desplazará la máquina perforadora, esta máquina extrae el material por medio de una broca rotatoria, de percusión y de circulación inversa.

Después de comenzar la excavación y extracción del material se inyecta bentonita por el exterior de la broca y ésta a la vez que licúa el material extrae la mezcla de rezaga y bentonítica por medio de una tubería de succión interior a la misma, depositando el material en un tanque sedimentador colocado en la superficie a un costado de la lumbrera y en el cual se trata para recuperar la mayor parte de bentonita, para inyectar nuevamente.

La maquinaria además de su movimiento vertical rotatorio cuenta con un movimiento horizontal y por lo mismo excava todo el sector anular (figura 5.3 y 5.4).

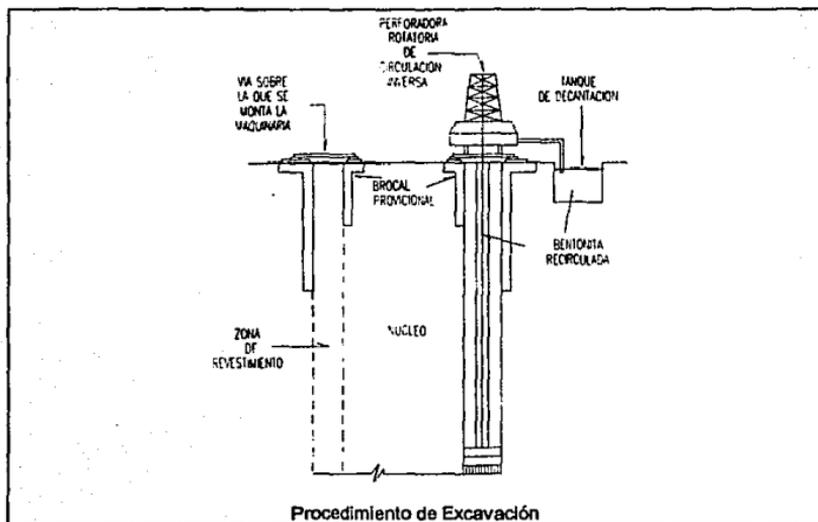


figura 5.3

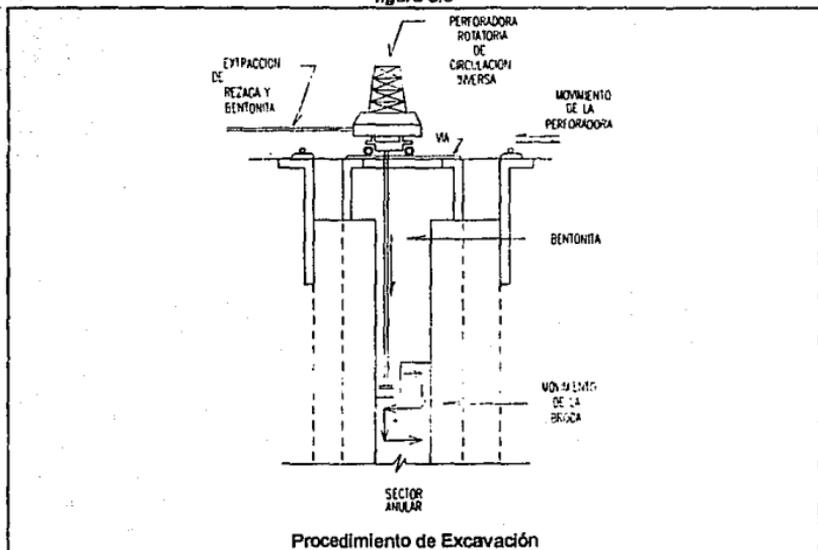


figura 5.4

Cuando se termina la excavación de este sector anular y por supuesto adomado con bentonita, se bajan unas parillas previamente armadas y se hace el colado del muro de la lumbrera colocando concreto a través de un tubo "tremie" desplazando éste a la bentonita por diferencia de densidades.

- 2.- La segunda variante de este procedimiento consiste en que el mismo taladro a la vez que perfora lo hace con mayor diámetro en los extremos del sector anular en donde se coloca una tubería, dicho sector está limitado en ambos extremos (tubos tremie) para proceder a colar como se expuso anteriormente (figura 5.5)

Después que el concreto fragua lo suficiente, se retira la tubería y se procede a la excavación del siguiente sector (dentro del mismo sector anular), quedando la junta de colado como muestra la figura 5.5.

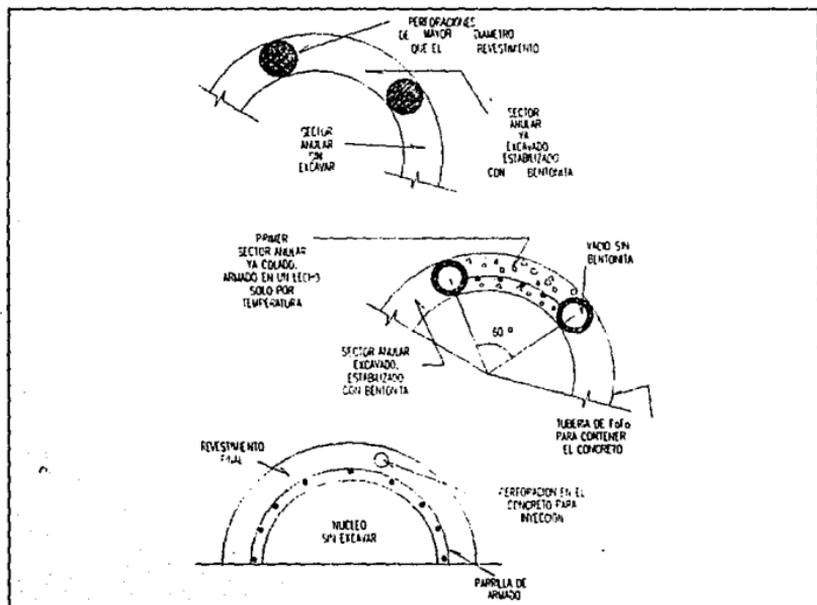


figura 5.5

Una vez excavado y colado el muro de la lumbrera, es decir revestido el muro, se excava el núcleo por medio de una draga con almeja y si no registra ningún burfamiento importante al estar haciendo las mediciones periódicas para efecto del control del fondo, no es necesario estabilizar a éste con agua o lodo bentonítico. Si a medida que avanza la excavación del núcleo de la lumbrera se encuentran fuertes escurrimientos por las juntas de colado, se procede hacer barrenos para inyectar lechadas de agua cemento y en algunos casos arenas silicas, taponando perfectamente bien cualquier fuga y llenando los huecos que pudieran existir dentro del revestimiento como se muestra en la figura 5.5.

TECNICA ESTRELLA

La técnica por flotación consiste básicamente en lo siguiente:

Después de localizado el centro de la lumbrera se procede a marcar dos brocales, uno exterior y otro interior, de menores dimensiones, formando un polígono de 16 lados, tal como lo muestra la figura 5.6.

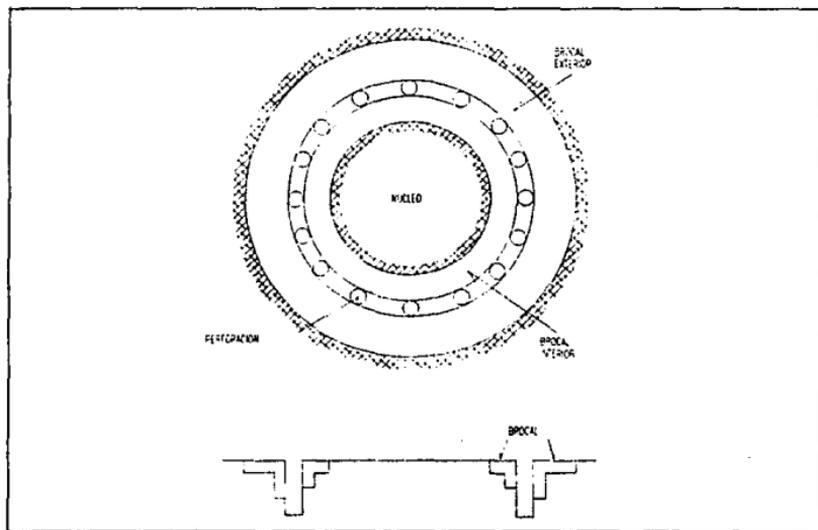


figura 5.6

El brocal interior es construido únicamente para marcar perfectamente bien los linderos del revestimiento y evitar deslaves del terreno. Posteriormente se perfora el material hasta la profundidad requerida, con un diámetro de 60 cm (24") y solamente en las uniones de los lados de la polygonal hasta complementar el círculo. El material que queda entre una perforación y otra se extrae por medio de una almeja y es reemplazado por lodo bentonítico, y así sucesivamente hasta complementar el cien por ciento de la excavación, en donde posteriormente irá el revestimiento. Lo anterior se explica gráficamente mediante la figura 5.7.

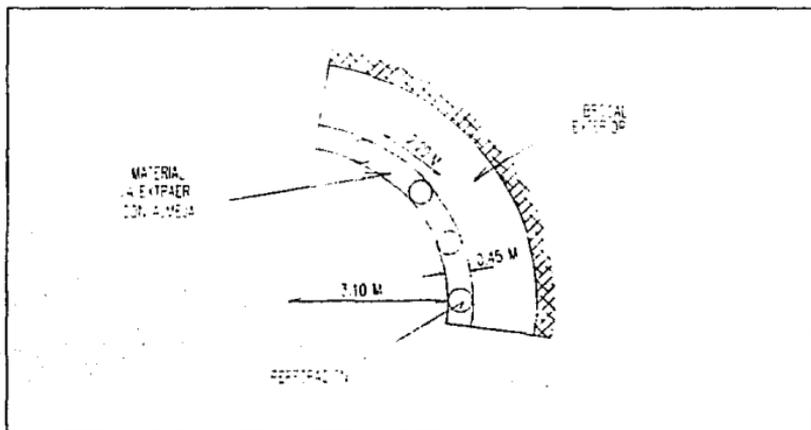


figura 5.7

Concluida la excavación perimetral, se demuele el brocal interior para poder extraer el núcleo mediante el uso de una almeja, estabilizando las paredes con bentonítica recirculada y con un control muy riguroso de densidad (figura 5.8).

Posteriormente, habiendo completado toda la excavación, se coloca una estructura de acero en forma de tanque cilíndrico invertido, el cual queda perfectamente bien anclado en el brocal exterior de la lumbrera. Inmediatamente después se cuela el fondo propiamente dicho de la lumbrera con una forma especial, quedando apoyado el revestimiento sobre la estructura y ésta, a su vez, sobre el brocal. La estructura sirve como cámara de flotación ya que esta perfectamente sellada contra fugas y tiene además preparaciones en donde se colocaron válvulas para permitir la salida del aire. Lo anterior se explica gráficamente en la figura 5.8.

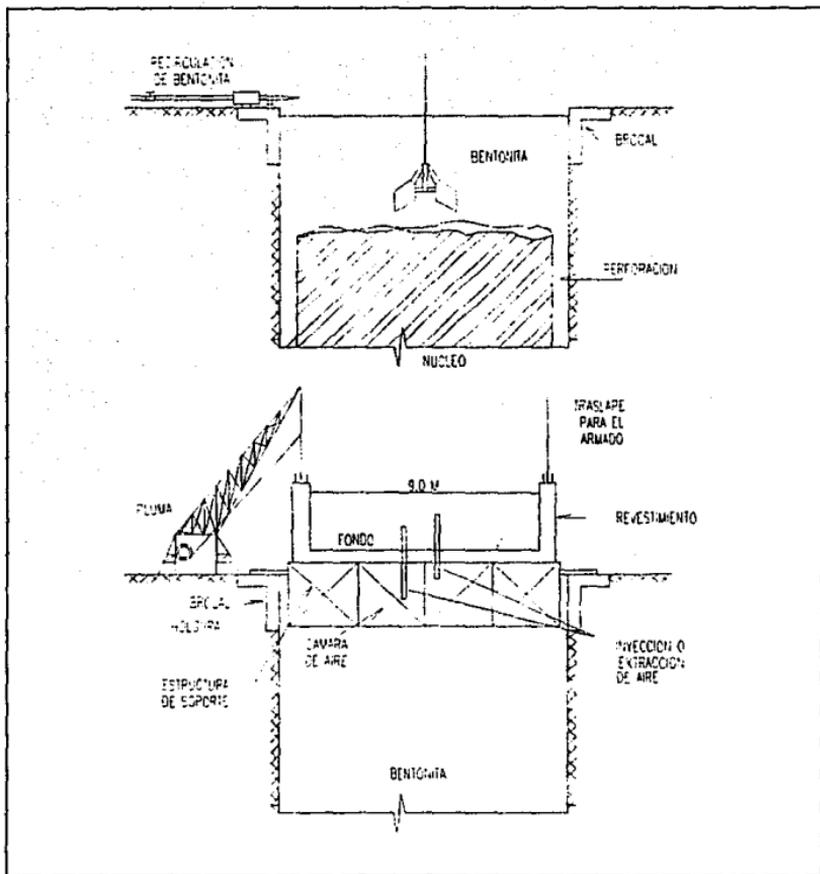


figura 5.8

La primera parte del revestimiento es sostenido por la estructura de acero y nivelada por medio de cuatro plumas colocadas en el brocal de la lumbrera, en el sentido de los ejes cardinales. Para estos se dejan ahogadas previamente en el concreto unas anclas de donde se engancha el puntero de la pluma, accionando por medio de un matalcate.

Para el proceso de bajar el revestimiento se hace de la siguiente manera: una vez que se tiene colada la parte inferior del revestimiento se inyecta aire a presión en la estructura para poder desplazar la bentonita que se encuentra dentro de la misma y permitir que suba para poder retirar las anclas de soporte, para continuar con el hincado de la estructura. Las plumas tienen la función de evitar un deslizamiento incorrecto del revestimiento, ya que el descenso del mismo debe ser tal que esté acorde con el fraguado de las formas anteriores.

Conforme se sumerge el revestimiento la bentonita es desplazada por la holgura que existe entre la pared de la excavación y el paño exterior del revestimiento, la cual es recolectada por medio de canaletas construidas en el brocal.

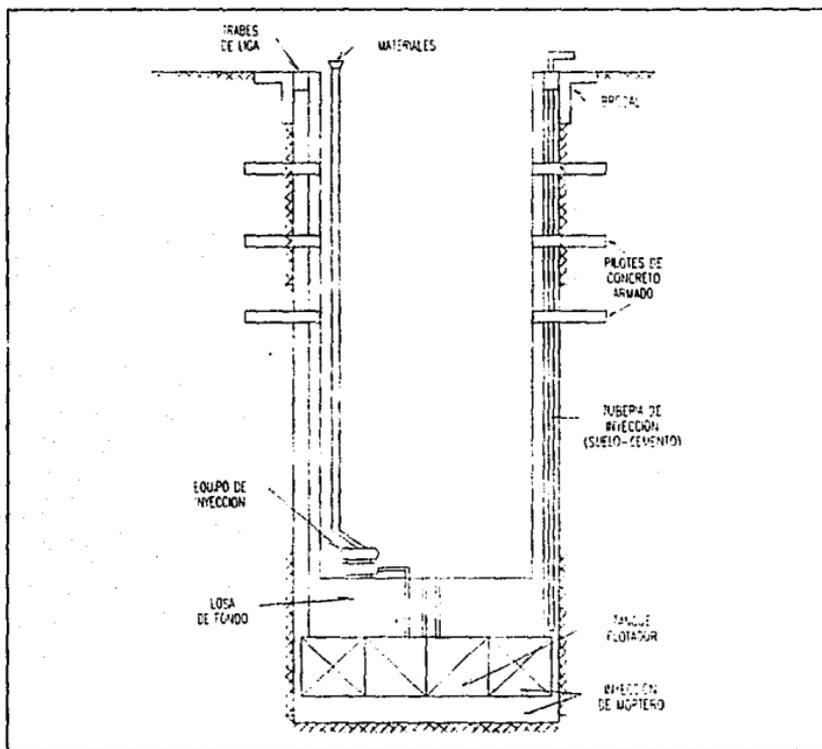


figura 5.9

Una vez terminado el sumergido total del revestimiento, se inyecta una mezcla de agua-cemento-arena sílica a la estructura por las preparaciones existentes para extracción o inyección de aire, logrando de esta forma un mejor asentamiento del fondo de la lumbrera. También el revestimiento se liga al terreno por medio de pilotes horizontales de concreto armado (figura 5.9), terminados en punta de sección cuadrada de 0.30 m x 0.30 m y 3 m de longitud, insertados en una preparación previamente hecha en el revestimiento; además está unido al brocal por medio de ocho traveses de concreto armado, de 0.70 m x 1.5 m. En la holgura que queda entre el revestimiento y la pared de la excavación se inyecta suelo-cemento hasta extraer toda la bentonita y así dar mayor rigidez al conjunto.

TECNICAS ICOS

Excavación de lumbrera tipo Muros Milán

Antes de iniciar la perforación de los muros de la lumbrera, se procede a marcar sobre el terreno, un hexágono circunscrito a un círculo cuyo diámetro puede ser de 9.0 m, donde posteriormente irán los muros rectos del revestimiento primario hasta la profundidad deseada. En el exterior se construye un brocal de concreto para poder colocar la máquina perforadora y la almeja.

En seguida se hacen perforaciones de 0.60 m de diámetro a toda la profundidad, estabilizando las paredes con bentonita. Las perforaciones tienen entre sí una distancia de aproximadamente 2 m y siempre se hacen coincidir con las esquinas de los lados de hexágono (figura 5.10). El material dejado entre las perforaciones es extraído con una draga con almeja, estabilizando las paredes con bentonita.

Realizando todo esto se procede a bajar el armado en tramos de 12 m (2 techos), uniéndose cada tramo por medio de traslapes de 1,50 m. El colado de los muros de la lumbrera se hace con tubería "tremie" (figura 5.11). Al ir inyectando concreto va desplazando la bentonita por diferencias de densidad hasta finalizar con el colado de una de las paredes del revestimiento primario (lado del hexágono), para continuar con la siguiente y así sucesivamente hasta que se completa con el hexágono. Para las juntas de colado se deja una tubería que impide que a la hora de estar inyectando concreto se salga de su lugar, y es extraída la tubería una vez que el concreto tenga su fraguado inicial (figura 5.11).

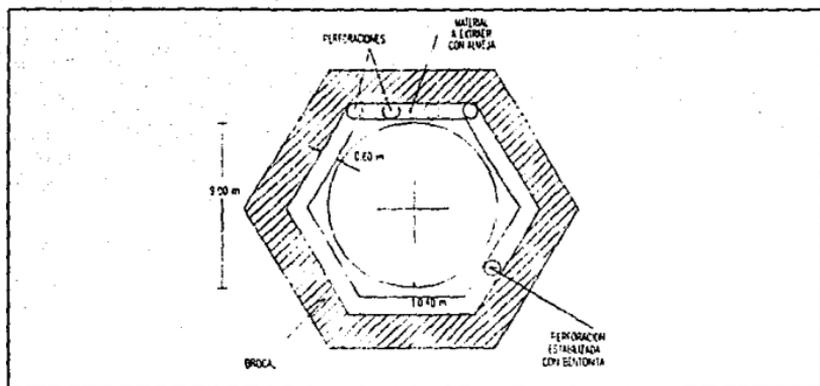


figura 5.10

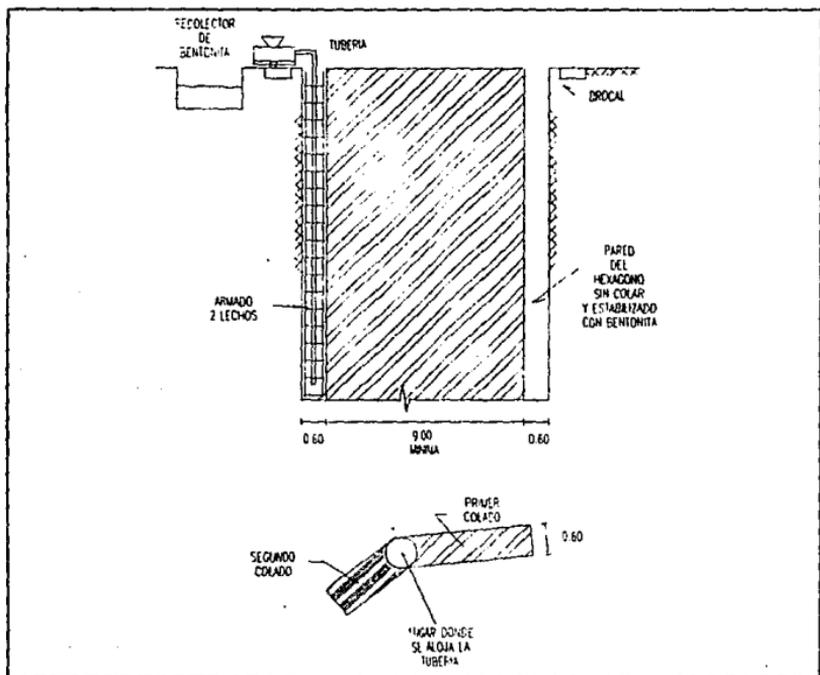


figura 5.11

Una vez colada las paredes del hexágono, se procede a excavar a base de pico y pala, una corona circular de 1,4 m de altura para hacer más rígida la parte superior de la lumbrera, colándose monolíticamente junto con el primer anillo del revestimiento secundario.

La altura del anillo es de aproximadamente de 2.0 m, con un espesor mínimo de 0.40 m su armado se integra al de la corona y se ancla a la pared del hexágono (figura 5.12).

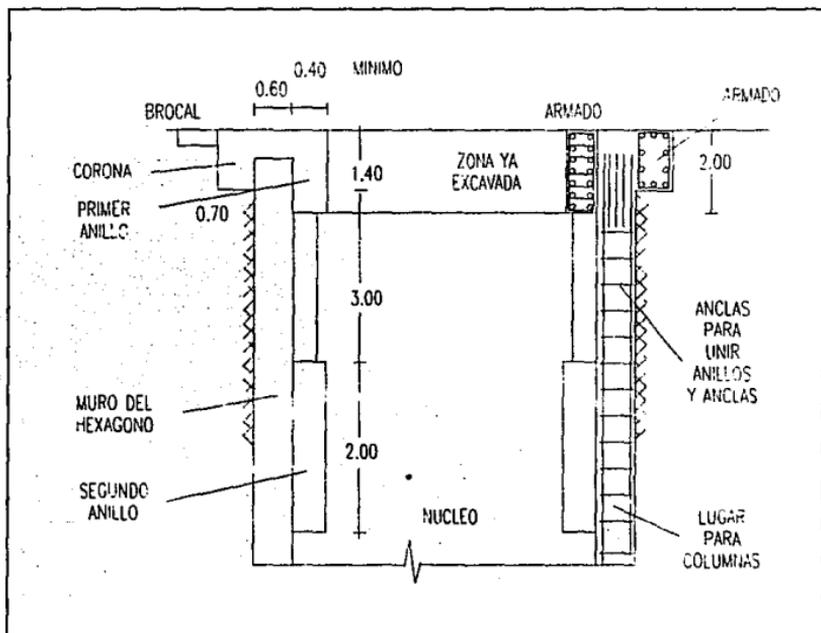


figura 5.12

Después que el concreto de la corona y del anillo ha fraguado, se retira la forma metálica que se utiliza como cimbra y se excava el núcleo de la lumbrera hasta la profundidad de 3.0 m medidos a partir del paño inferior del primer anillo. Todo esto se hace con el fin de colar en las esquinas del hexágono unas pequeñas columnas cuyo armado es anclado al de las paredes del revestimiento y sirve para disminuir las filtraciones, separar los anillos y dar mayor rigidez a la estructura. Las columnas tienen una altura de 3.0 m (figura 5.13).

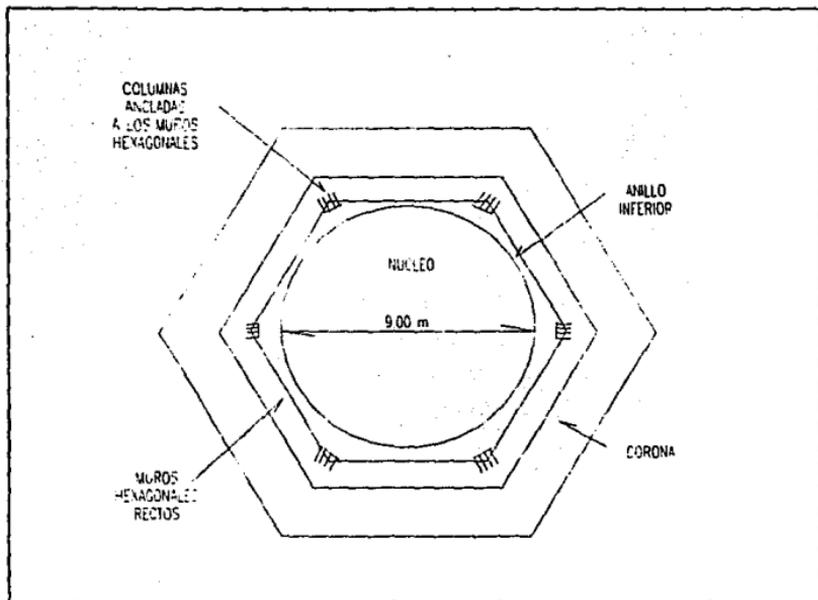


figura 5.13

El mismo procedimiento anterior expuesto se repite hasta llegar a una profundidad de 25.0 m. De este nivel en adelante o un poco antes el revestimiento puede ser continuo, es decir, no hay necesidad de colarse columnas en las esquinas sino que los anillos se continúan hasta el fondo.

El fondo de la lumbrera puede colarse de acuerdo a las circunstancias y/o tipo de terreno, por ejemplo: en un suelo como el del D.F., (arcilloso), puede obtenerse por hacerlo cóncavo para que esté en mayores condiciones de resistir las presiones del mismo suelo, y lógico que el agua que queda acumulada dentro de la lumbrera se bombea para poder hacer el colado del fondo de dicha lumbrera. Previamente a todo esto se hace una primera losa de fondo y después la segunda, en la cual se ancla el armado del revestimiento secundario por medio de soldadura, teniendo un espesor mínimo (2ª losa) de 0,80 m.

TECNICA TGC

Esta técnica se aplica bajo ciertas consideraciones tanto geométricas como tomando en cuenta las características del suelo donde se van ubicar las lumbreras de acceso; estas son principalmente de sección circular con un diámetro aproximado de 3 a 4 m y una profundidad de 17 a 25 m y siendo las características del suelo las de la zona del lago en el centro de la Cd. de México.

El procedimiento constructivo para llevar a cabo la construcción de lumbreras sea:

Localización de la lumbrera, marcando sobre el terreno el diámetro exterior deseado para la iniciación de la construcción de la lumbrera.

Se inicia la excavación vertical con pico y pala en tramos de 1 m, donde se va necesitando la estabilización de las paredes de la lumbrera se coloca concreto lanzado con una malla electrosoldada con un espesor de 7.5 cm a todo su alrededor, así durante toda la excavación hasta el final y tomando en cuenta que es principalmente para la seguridad del personal que opera dentro de ella ya que no es el ademe definitivo que posteriormente mencionaremos,

Para el abatimiento del nivel freático se colocan alrededor de la lumbrera un sistema de puntas eyectoras hasta una profundidad de aproximadamente de 25 m, del nivel del terreno.

Se coloca un marco de acero sobre la lumbrera para la utilización de un malacate que se encuentra colocado junto a la lumbrera, para la extracción del material del fondo de la lumbrera.

Como se va avanzando en la excavación se va siendo necesario introducir un equipo tanto de iluminación como de inyección de aire, por las características que este tipo de lumbreras presenta.

Al término de la excavación se coloca una cimbra perdida de madera para colar una losa de fondo de concreto armado con espesor de aproximadamente 20 cm.

A continuación se coloca el acero de refuerzo para el ademe definitivo, que consta de una doble malla de varillas de 3/8" a cada 20 cm en ambos sentidos a todo lo largo de la lumbrera, posteriormente se procede a introducir una cimbra deslizante para el colado definitivo que va a tener un espesor de 30 cm y va hacer colada por tramos de aproximadamente 1 m hasta llegar a la parte superior evitando que el concreto fragüe lo suficiente para evitar cualquier tipo de juntas y que posteriormente no haya infiltraciones de agua hacia el interior de la lumbrera.

El concreto es inyectado por medio de bombas de concreto y trompas de elefante, al término del colado se coloca una escalera de acero en forma de caracol y se procede a la instalación de la iluminación.

Posteriormente en la parte superior a 1 m del nivel del terreno se hace un brocal con un registro con labio rojo, para evitar deslaves de material hacia el interior de la lumbrera; ya que el fin de este tipo de lumbrera no es exactamente para la introducción de maquinaria, ni para acceso para excavaciones horizontales, ni drenaje profundo, ni metro, etc., son principalmente para tener acceso al fondo de la lumbrera para la aplicación de la técnica de subexcavación.

Limpieza de la lumbrera y extracción de material de rezaga.

5.3.- METODOS PARA EL ABATIMIENTO DEL AGUA EN EXCAVACIONES

El agua es uno de los principales problemas que se presentan en los trabajos de excavación. Sin embargo teniendo un conocimiento del suelo y de las condiciones del agua y de las leyes del flujo hidráulico, se puede fijar con precisión el método de control del agua del terreno que garantice un esquema de construcción económico y seguro para cualquier condición.

La elección del método depende de las condiciones del lugar en que se localice. Estos métodos pueden ser:

- 1.- Bombeo con tubos de achique.
- 2.- Electrosmótico
- 3.- Bombeo por Gravedad

1.- BOMBEO CON TUBOS DE ACHIQUE

Este sistema comprende cierto número de pozos de filtración, alrededor de la excavación. Estos se conectan, por medio de unas tuberías principal al nivel del terreno que esta sometida al vacío por una unidad de bombeo. El agua fluye por gravedad hasta el pozo filtrador y es absorbida por el vacío hacia la tubería principal, siendo descargada a través de la bomba.

Este sistema tiene la ventaja de que el agua es extraída de la excavación, estabilizándose así los lados y permitiéndose unas pendientes más inclinadas, además de que el agua es filtrada a medida que se elimina del terreno y lleva, por lo tanto, muy pocas partículas en suspensión. Un inconveniente de este sistema es su limitada altura de succión. Una limitante es el descenso del nivel de agua, que prácticamente es de 4 a 8 m. por debajo del nivel de bombeo.

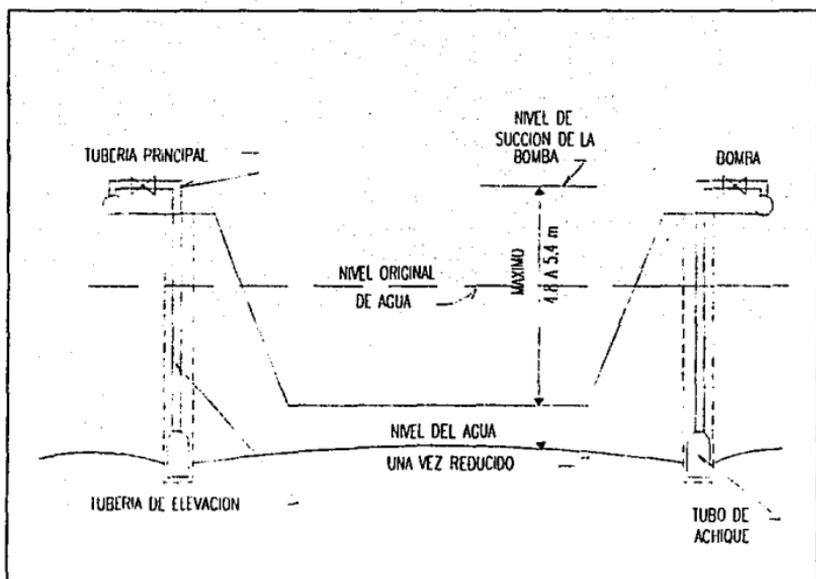


figura 5.14

Los tubos de achique consisten en un filtro de malla de unos 0.90 m de longitud y de 6.25 a 7.5 m de diámetro que rodea a una tubería central de elevación. El agua extraída a través del filtro cae en el espacio comprendido entre la malla y el exterior de la tubería y de allí va a la superficie. El fondo de la tubería de elevación termina en una válvula de retención, que suele ser, una esfera de madera recubierta de goma. Esta esfera es impedida contra el fondo de la tubería de elevación cuando se hace el vacío; los tubos de achique se instalan por inyección en el terreno hasta que la esfera de goma se separa del fondo y el agua inyectada fluye libremente por la boquilla dentada.

La capacidad de un tubo de achique sencillo con un tubo elevador de 5 cm. suele ser de unos 227 l/mm. Su separación alrededor de la excavación depende de la permeabilidad del suelo y del tiempo aprovechable para efectuar la extracción. (figura 5.14).

2.- ABATIMIENTO ELECTROSMÓTICO

Se utilizan en casos de estabilidad críticas de las excavaciones, en las arcillas blandas de la zona del lago.

La operación del sistema consiste en: Los electrodos negativos (pozo cátodo) se instalan en perforaciones de 25 cm de diámetro; llevadas hasta una profundidad de 4 m bajo el nivel de abatimiento especificado; los pozos se perforan de la misma manera que en un sistema de bombeo por gravedad.

Dentro cada pozo se instala el electrodo, formado por un tubo ranurado de acero negro cédula 40, de 10 cm de diámetro, envuelto en 2 capas de malla de mosquitero o una de geotextil el tubo va provisto de 3 ángulos de 1" X 1" 3/16", soldados mediante soleras de 1½" X ¼", espaciadas a cada 50 cm a lo largo del tubo; estos ángulos proporcionan el contacto eléctrico con la pared del pozo, como muestra la sección transversal (figura 5.16).

Dentro del tubo una bomba eyectora que abate el nivel del agua en el pozo hasta una profundidad de 3 m bajo el nivel de abatimiento mínimo especificado.

Intercalados entre los pozos-cátodo se instala, los ánodos; estos electrodos positivos son varillas de acero, corrugadas o lisas, de ¾" de diámetro, hincadas hasta la misma profundidad que los pozos-cátodo.

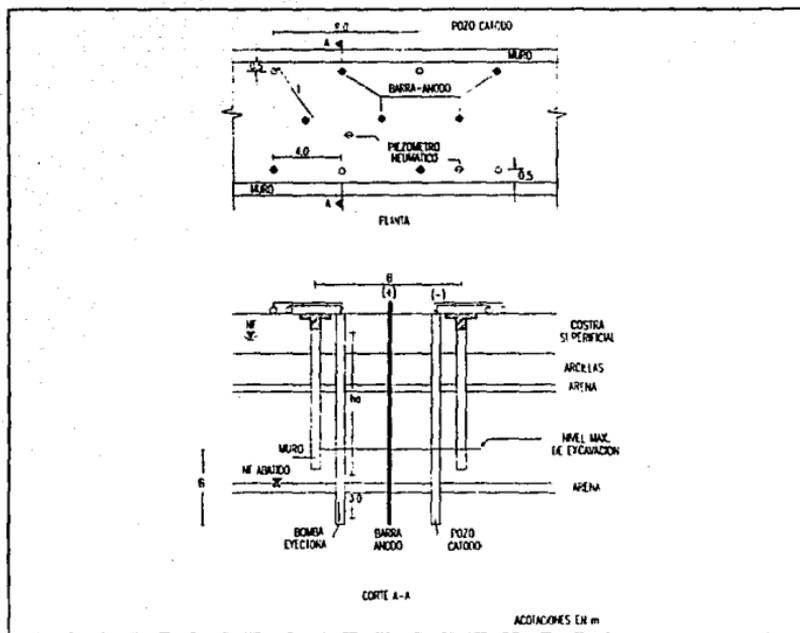


figura 5.15

Las barras para los ánodos deben protegerse con pintura epoxica en los tramos que estarán en contacto con capas de arena, para evitar una corrosión electrolytica y prolongar su duración sin perder el buen contacto eléctrico con el suelo. Las bombas eyectoras se podrán en funcionamiento al mismo tiempo que se conectan los electrodos a la fuente de corriente continua, teniendo especial precaución de verificar la correcta polaridad (los pozos a la terminal negativa y las barras a la positiva) el potencial eléctrico (V) deberá generar un gradiente eléctrico medio 1 cm de 0.15 a 0.20 Volts/cm; la velocidad de abatimiento del nivel freático se verificará mediante piezómetros neumáticos; no se deberá comenzar a excavar antes de alcanzar el nivel de abatimiento mínimo especificado.

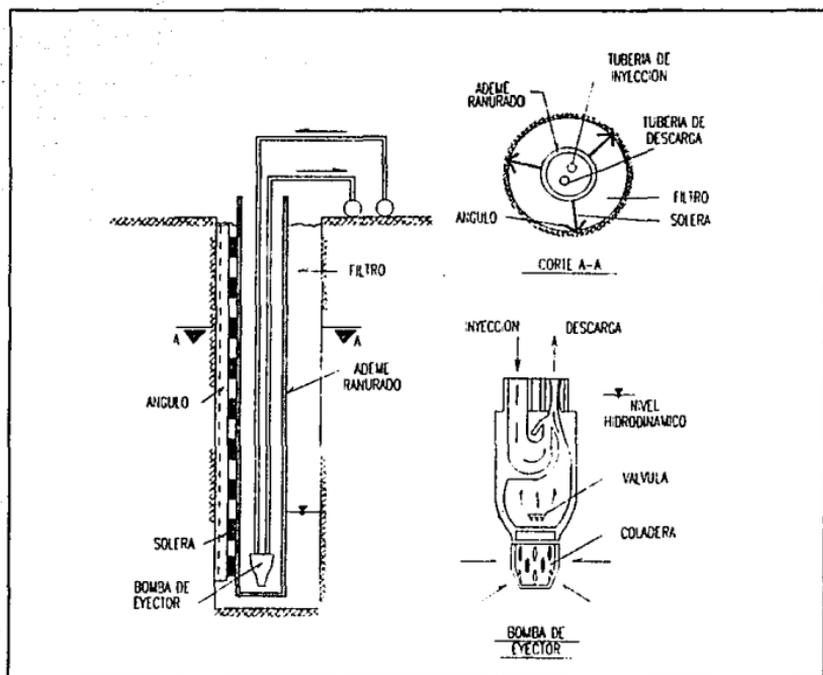


figura 5.16

3.- BOMBEO POR GRAVEDAD

La instalación de un sistema de bombeo por gravedad, necesario para abatir el nivel freático y así evitar la falla de fondo de la excavación por supresión y mantener las expansiones durante la contracción dentro de los límites tolerables y controlar el agua libre para facilitar los trabajos de construcción; a) la geometría y localización de los pozos y b) el procedimiento de instalación y los materiales comúnmente utilizados.

El sistema de abatimiento esta formado por una serie de pozos profundos que deben atravesar el posible extracto de arena que subyace el fondo de la excavación, penetrando 1.5 m por debajo del estrato (figura 5.17).

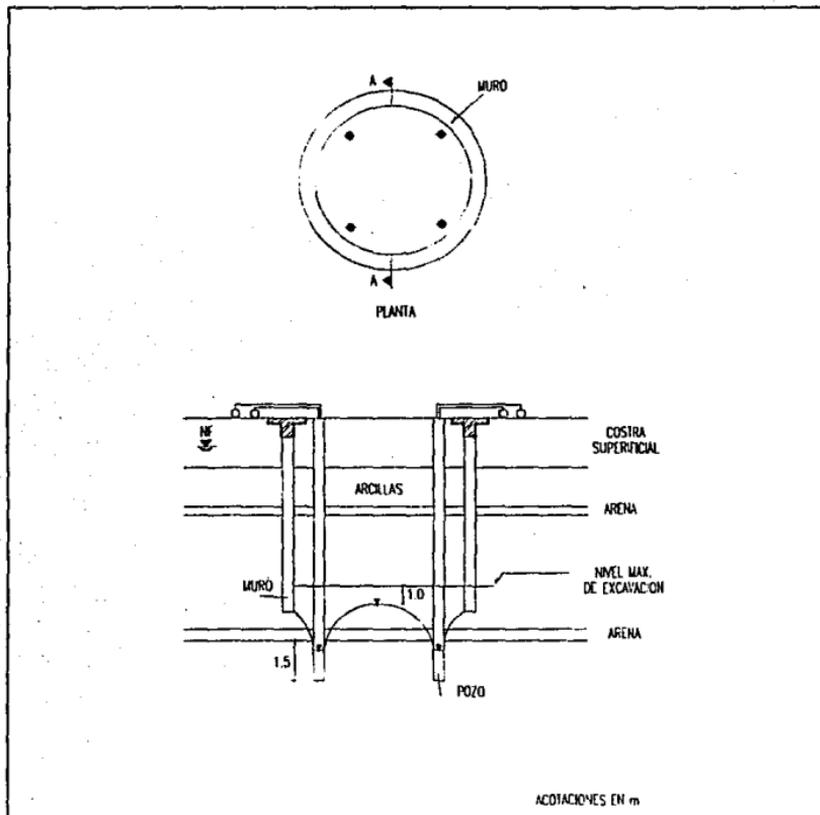


figura 5.17

Los pozos se perforan con máquina rotatoria, equipada con una broca del tipo de aletas, inyectando agua como fluido de perforación: (diámetro = 25 cm), una vez alcanzando la profundidad especificada se lava el pozo, hasta que el agua de retorno salga limpia.

Posteriormente, en la perforación se coloca el ademe ranurado, formado por un tubo de PVC de 7.5 a 10 cm de diámetro interior, con ranuras de 1 mm.

El espacio anular entre el ademe y la pared del pozo se rellena con gravilla de tamaños variables entre 5 y 10 mm, en toda la longitud del pozo.

Dentro del ademe se instalan bombas de eyección a una profundidad no menor de 3 m bajo el nivel del fondo de la excavación, a fin de garantizar el nivel piezométrico abatido mínimo de 1 m bajo el fondo; las bombas eyectoras deben tener tubo de inyección de 13 mm de diámetro y salida de 19 mm (figura 5.18).

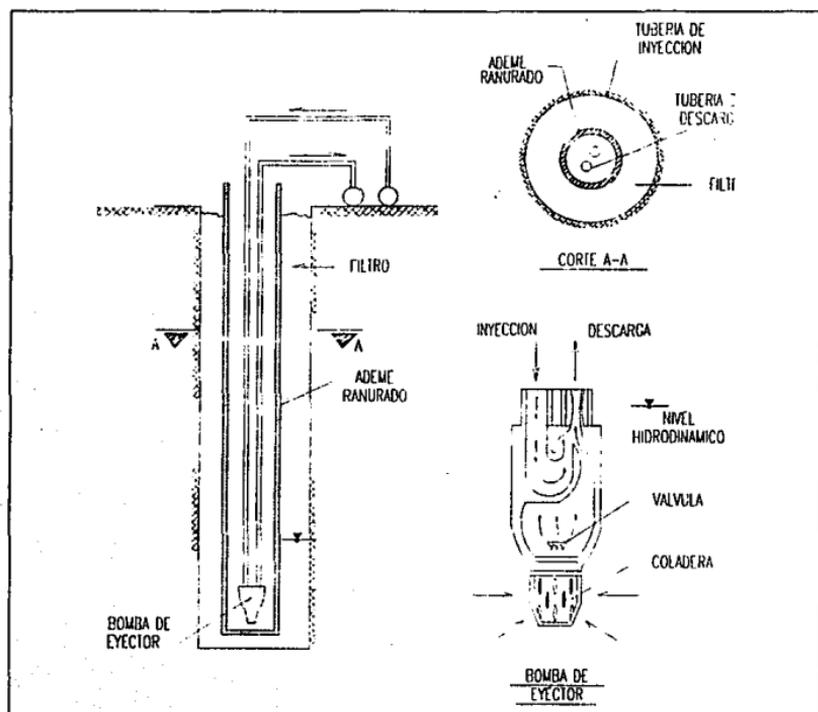


figura 5.18

CASOS QUE SE REQUIERE EL BOMBEO EN LA EXCAVACION

- 1.- En un sitio que no se cumple la condición de estabilidad del fondo.
Cuando el bombeo por gravedad no sea eficiente para abatir las presiones de poro, podrá requerirse el empleo de bombeo electrosmótico.
- 2.- En un sitio en el que existan uno o más estratos permeables que requieran del abatimiento de la presión de poro para evitar la falla por supresión, puede reducirse al empleo de pozos de alivio o bombeo por gravedad, al final de la construcción los pozos de alivio o de bombeo deben de sellarse, vigilando que queden drenes conectados al interior del cajón.

5.4.- ANALISIS PARA LA CONSTRUCCION DE LUMBRERAS Y METODOS PARA EL CONTROL DE AGUA EN EXCAVACIONES ENFOCADAS A LAS CARACTERÍSTICAS DE LA ZONA DE LA CATEDRAL

Técnica para la selección de la lumbrera

TECNICA	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Solum		Sólo grandes diámetros, uso de equipo grande, inestabilidad por uso de agua.
Solentache		Uso de taladro barrenador y demás equipo, uso de bentonita (costo).
Estrella		De gran diámetro, uso de maquinaria compleja y uso de bentonita (costo).
ICOS		Es de gran diámetro y uso de maquinaria pesada.
TGC	Excavación manual con diámetro de 3.4 m, estabilización con malla electrosoldada, costo y tiempo mínimo.	

Técnica para la selección del sistema de Bombeo

TECNICA	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Tubos de Achique		Se limita a la altura de succión que es de 4 a 8 m bajo el nivel de bombeo.
Electromóvil		Se limita a la altura, se usa con prioridad para cajones del metro.
Bombeo por Gravedad	No se limita a la profundidad de las lumbreras, se trabajan en conjunto para mayor eficiencia.	

Capítulo 6

CONSIDERACIONES TEORICAS SOBRE LA ESTABILIDAD EN LA EXCAVACION DE LUMBRERAS

6.1.- Presiones mutuales

6.2.- Falla de fondo

6.3.- Falla por subpresión

6.4.- Falla por extrusión

6.1.- PRESIONES RADIALES

Primeramente cabe hacer la distinción hecha por Terzaghi; en lo concerniente a la diferencia entre perforaciones pequeñas (barrenos) y perforaciones de gran diámetro (lumbreras o liros). En comparación con un barreno, cuyo diámetro no exceda de unos pocos centímetros, una lumbrera es una excavación de ancho mínimo de igual a un metro.

La obtención de una información muy importante como lo es la determinación de la magnitud y orientación del cambio del estado de esfuerzos en una masa de suelos localizada en el contorno de una lumbrera, permite diseñar el ademado provisional que contendrá los empujes del terreno durante el tiempo de los trabajos de excavación y posteriormente el diseño estructural del revestimiento definitivo.

Esta información obtenida a base a datos prácticos o teóricos es uno de los factores determinantes para la selección del procedimiento constructivo a utilizar. Los datos prácticos se adquieren directamente de la experiencia constructiva y los teóricos en base al empleo de alguna de las teorías de Mecánica de Suelos existentes; el objeto del presente capítulo es el de dar a conocer someramente las teorías fundamentales comúnmente utilizadas actualmente para la estimación de presiones radiales.

CRITERIO DE BERESANTSEV

Una de las teorías fundamentales en la actualidad para el análisis y diseño de lumbreras es la teoría de Beresantsev, ya que proporciona resultados aproximados a la realidad.

Beresantsev supone que debido al abatimiento de aguas freáticas en el desarrollo de excavaciones profundas se induce un hundimiento superficial en el contorno de la lumbrera, dando la primera solución exacta para el problema axial-simpétrico, el cual puede compararse con la solución de Rankine para el caso de dos dimensiones.

Además, Beresantsev ha dado una solución aproximada, suponiendo una ruptura lineal en el plano inclinado a $45^\circ + \frac{\phi}{2}$ con la horizontal.

De una forma simplificada del planteamiento, Beresantsev desarrollo una expresión para obtener las presiones radiales:

$$\sigma_r = \gamma r \cdot \frac{\tan(45^\circ - \frac{\phi}{2})}{k-1} \left[1 - \left(\frac{r_0}{r} \right)^{k-1} \right] + q \left(\frac{r_0}{r} \right)^k + C \cotan \phi \left[\left(\frac{r_0}{r} \right)^k + \tan^2(45^\circ - \frac{\phi}{2}) - 1 \right]$$

donde:

$$K = 2 \tan \phi \tan(45^\circ + \frac{\phi}{2})$$

$$R = r_0 + z \tan(45^\circ - \frac{\phi}{2})$$

r = Radio de la excavación.

z = Profundidad a la cual interesa conocer la presión radial.

ϕ = Ángulo de fricción interna

q = Sobrecarga (ton/m^2)

δ = Peso volumétrico del material (ton/m^3)

c = Cohesión (ton/m^2)

Es claramente demostrado que debido a la acción o efecto de arqueo en la masa del suelo que lo circunda los incrementos de presión de suelo decrecen progresivamente con la profundidad, después de alcanzar un cierto límite se define un valor constante, justamente como el caso de la presión lateral de un silo. La profundidad crítica menor se obtiene con el mayor ángulo de fricción interna y con el menor radio de la lumbrera.

La presión específica actuante en forma de un anillo en un tiro de mampostería con una profundidad unitaria de 1 m puede ser tomado como $P = e + w$, donde el valor para "e" puede ser calculado. Por supuesto, en consideración de ambos en la elevación y en sumergimiento de la densidad del suelo, "w" será la carga hidrostática. Esto puede ser escrito como:

$$Pr = \sigma v$$

$$v = \frac{Pr}{\sigma}$$

donde:

r = Radio relativo al centro de la línea del pozo.

v = Espesor de la pared del tiro.

El deslizamiento transversal de lumbreras rectangulares puede ser trasladado fuera por los mismo efectos, pero las secciones pueden ser repartidas con un estructura cerrada.

Los muros de un tiro pueden ser dimensionales contra esfuerzos axiales por tensión y pandeo, resistentes durante el transcurso de iguales o repentinos hundimientos.

ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE LA EXCAVACION QUE ALOJA LA LUMBRERA

De acuerdo a experiencias adquiridas en el desarrollo de procesos constructivos se ha demostrado, que cuando una excavación alcanza una profundidad específica, es necesario realizar un análisis cuidadoso de las condiciones geométricas y mecánicas (estudio del suelo) de la excavación para decidir el procedimiento constructivo.

En muchas ocasiones se han observado levantamientos del fondo de la excavación misma que fue ademada lateralmente, en otras ocasiones también se han presentado extrusión del material por los intersticios (huecos) de una ademe abierto, esto comunmente se presenta a profundidades mayores entre los 10 y 15 m.

Lo anterior, dió origen a resolver los procesos constructivos de lumbreras, sobre todo en suelos blandos en las que se evitará las siguientes fallas:

- Falla de fondo.
- Falla por supresión.
- Falla por extrusión.

A continuación se describe someramente algunas consideraciones teóricas para la determinación de la estabilidad de la excavación.

6.2.- FALLA DE FONDO

Cuando se realiza una excavación sobre o en estrato de arcilla blanda, se corre el riesgo de que se produzca una de las fallas mas frecuentes y peligrosas como es la falla de fondo. En este tipo de fallas ocurre un asentamiento de terreno vecino, acompañado por el levantamiento general rápido del fondo, lo que sucede en realidad es que el material vecino fluye hacia el centro de la excavación, que se levanta correspondientemente.

Existen varios criterios teóricos en la actualidad para la estimación de la estabilidad de una excavación contra la falla de fondo, entre los fundamentales podemos mencionar: el Criterio de Terzaghi, el Criterio de Skempton y el Criterio de Bjerrum y Eide. A continuación se va hacer la descripción de solo uno de ellos que consideramos el mas conveniente.

- Criterio de Skempton

En la figura 6.1 muestra las consideraciones teóricas hechas por Skempton. En su análisis el autor supone que la capacidad de carga de una arcilla, a una profundidad D_f está dada por:

$$q_c = CNc + \gamma D_f$$

para el caso de la existencia de una sobrecarga de magnitud q , el valor de q_c pasa a ser:

$$q_c = CNc + \gamma D_f + q$$

En el segundo miembro de la ecuación, el término "CNc" representa la resistencia del suelo a lo largo de una superficie de falla, en tanto que el término $\gamma D_f + q$ representa el esfuerzo al nivel de desplante debido al peso del suelo suprayacente y a las sobrecargas que hubiere. En el caso de una excavación, en el instante de la falla de fondo, la resistencia a lo largo de la superficie de falla (CNc) se opone al flujo del material, a donde tiende a moverse por efecto de la presión $\gamma D_f + q$. Por lo consiguiente en la falla se tendría:

$$CNc = \gamma D_f + q$$

Esta ecuación da la profundidad máxima a que puede llevarse la excavación, sin que falle. Skempton al igual que Terzaghi como una precaución adicional adoptó la inclusión de un factor de seguridad en su ecuación así:

$$\gamma D_f + q = \frac{CNc}{F.S.}$$

$$F.S. = \frac{CNc}{\gamma Df + q}$$

Esta expresión permite estimar la seguridad contra la falla de fondo.

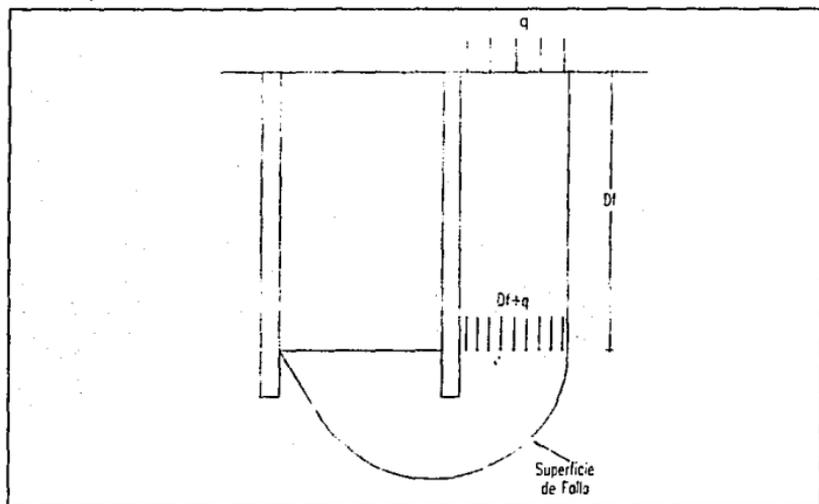


figura 6.1

6.3.- FALLA POR SUBPRESION

El agua es uno de los factores más importantes en la resistencia, compresibilidad y cambios de volumen del suelo. El nivel freático es la superficie superior de una masa de agua subterránea, y es el nivel al cual la presión de agua es cero.

Cuando el acuífero está confinado entre dos estratos impermeables el agua puede estar a presión; cuando esto sucede, la elevación de cero presión está por arriba de la superficie exterior del agua, y se dice que el agua subterránea tiene presión artésiana.

Las excavaciones que se extienden hasta cerca de los estratos que están bajo presión artésiana se pueden dañar por un levantamiento del fondo. La presión del agua, que al principio estaba balanceada por el peso del suelo superyacente, hace, al fallar éste, que el suelo que queda se mueva hacia arriba adentro de la excavación, o si los suelos son arenas finas y limos se producen en estos la condición de movedizas; por que en ellos sólo se produce una pequeña cantidad de filtraciones con una gran diferencia de carga.

Al flujo del agua acompaña con frecuencia un alto esfuerzo neutro por la diferencia de carga. Si como resultado de esto la presión efectiva se hace cero, el suelo perderá toda su resistencia y se volverá movedizo y en estas condiciones es como un flujo pesado; no resistirá esfuerzos y, si no está confinado fluirá.

El levantamiento implica insuficiente carga total P, para contrarrestar la fuerza de subpresión U. En los casos en que los gradientes son extremadamente altos, $i > 1$, se puede producir sifonamiento aunque $P > U$. El arrastre friccional del agua mueve partículas más finas del suelo aunque la mayoría estén impedidas de moverse; entonces el flujo se concentra en la zona destruida, agravando la situación hasta que se produce el verdadero sifonamiento.

Esfuerzo Efectivo.-

Una carga P uniformemente distribuida sobre granos de suelo irregulares con poros entre ellos, el esfuerzo es extremadamente alto en los puntos de contacto entre los granos y menor entre ellos. El esfuerzo en la fase sólida se expresa en términos del área total A y la carga total soportada por la fase sólida P' (figura 6.2).

$$P = P'$$

dividiendo ambos miembros entre A

$$\frac{P}{A} = \frac{P'}{A}$$

$$\sigma = \sigma', \quad \sigma' = \frac{P'}{A} \dots\dots\dots (6.1)$$

- Donde: P = carga total
 σ' = esfuerzo efectivo
 P' = carga que resiste la fase sólida
 A = área total

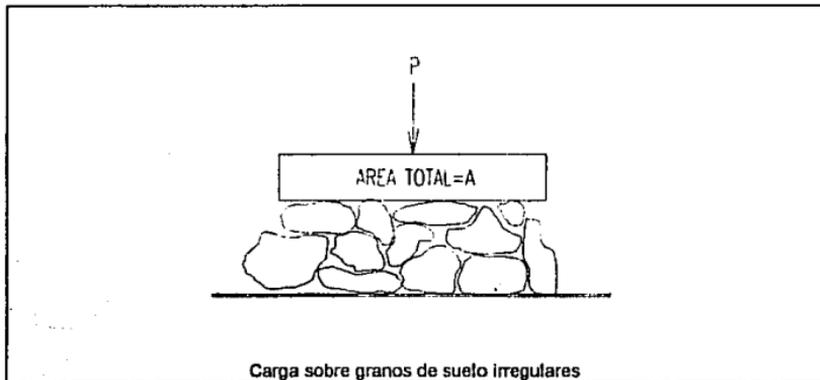


figura 6.2

Esfuerzo Neutro.-

Si se aplica una carga total P a un suelo constituido por sólidos y poros, habiendo dentro de éstos últimos una presión u , la distribución de la carga es más compleja. Si el área de los poros en contacto con la carga es A_v la fuerza uA_v soportará parte de la carga, la distribución de la carga queda definida por:

$$P = P' + uA_v \dots\dots\dots (6.2)$$

- Donde: P = carga total
 P' = carga soportada por la fase sólida
 uA_v = carga soportada por el agua

Dividiendo ambos términos de la expresión 6.2 por A , que es área bruta o total, se tiene:

$$\frac{P}{A} = \frac{P'}{A} + u(Av / A)$$

$$\sigma = \sigma' + u(Av / A) \dots\dots\dots(6.3)$$

Esta es la ecuación del esfuerzo efectivo, que es fundamental para comprender el comportamiento del suelo a los esfuerzos. La presión en los poros o presión intersticial, u frecuentemente se denomina esfuerzo neutro, porque es incapáz de soportar esfuerzo cortante.

Area de Poro.-

El área de poros sobre la cual actúa el esfuerzo neutro o presión intersticial, se define por la relación de esfuerzo neutro, N:

$$N = \frac{Av}{A} \dots\dots\dots(6.4)$$

En los suelos el área de contacto entre los granos es pequeña y la relación N es prácticamente igual a 1, la ecuación 6.3 para suelos queda simplificada:

$$\sigma = \sigma' + u \dots\dots\dots(6.5)$$

Si la fuerza hacia arriba en un área A es igual o excede a la carga total P de suelo, agua y estructura, se crea una zona de inestabilidad o de falla potencial. En el punto de falla,

$$P = U \text{ y } \frac{P}{A} = \frac{U}{A}, \sigma = u$$

Estimación de la Subpresión (u).

El análisis de la estabilidad de la excavación se realiza en dos etapas: una de ellas es al momento de realizar la excavación, y la otra es en el momento de tener terminada totalmente la estructura. Correspondiéndole a cada una de estas etapas un análisis a corto y largo plazo, respectivamente.

Análisis a corto plazo: La estimación del empuje del agua se realiza variando la profundidad, determinándose de esta forma la profundidad crítica. Considerándose las posibles filtraciones hacia la excavación, de acuerdo al tipo de material que se tenga y a las condiciones piezométricas medidas en el sitio.

Si el abatimiento del nivel freático es insuficiente para evitar el flujo de agua hacia el interior de la excavación, las fuerzas de filtración pueden ocasionar la tubificación del material del fondo.

Cuando hay movimiento de agua, la presión u se calcula por la red de flujo. La carga total h en cualquier punto está dada por la línea equipotencial. Si la elevación de ese punto es z , la carga es $h-z$. La presión del agua es:

$$u = \gamma_w(h-z) \dots\dots\dots (8.6)$$

Análisis a largo plazo.- En este caso, se requiere saber la profundidad total de la lumbrera y los niveles piezométricos para calcular la subpresión en el fondo, una vez que se tiene este dato, se requiere calcular el peso total de la lumbrera para contrarrestar el empuje del agua. Si la estructura es débil la subpresión la puede romper provocando el estallido del piso del basamento o el derrumbe de los muros. Si la estructura es fuerte, pero ligera, puede moverse hacia arriba o flotar apartándose de su posición original.

Para estar del lado de la seguridad, al revisarse la estabilidad del fondo, se determina un factor de seguridad contra subpresión de la manera siguiente:

$$F.S. = \frac{PL}{U} > 2 \dots\dots\dots (8.7)$$

- Donde: PL= peso de la lumbrera
U= fuerza de la subpresión
F.S.= factor de seguridad

En este caso, se entiende que no hay flujo y la presión u se puede calcular como:

$$u = \gamma_w(z) \dots\dots\dots (8.8)$$

6.4.- FALLA POR EXTRUSION

Otra de las causas de inestabilidad en excavaciones profundas se llama "Falla por Extrusión", que dan lugar a realizar cuidadosos análisis y mejoramiento de los procesos constructivos.

La teoría de Broms y Bennemark permiten hacer el análisis para estimar la estabilidad de la excavación que alojar la lumbrera o túnel. Describiendo que la extrusión se presenta cuando la resistencia al esfuerzo cortante es inferior a la presión total dividida entre cinco.

En esta teoría existen dos alternativas similares para la valuación de la estabilidad de la excavación, las que a continuación se mencionan:

- Alternativa I

Gratificando, la resistencia al esfuerzo cortante por una parte y por la otra la presión vertical dividida entre cinco, para diferentes profundidades sobre los datos de la lumbrera a la que se va a estudiar.

- Alternativa II

Calculando el factor de sobrecarga con la ecuación $OFS = \gamma H/c$ y haciendo la comparación con los lineamientos obtenidos en base a observaciones reales, los que a continuación se enlistan:

- a) Si $\gamma H/c \leq 2$ a 3 , los movimientos en las paredes de la excavación son pequeños y esencialmente elásticos.
- b) Si $3 \leq \gamma H/c \leq 6$, los movimientos en las paredes de la excavación son predominantemente plásticos, incrementándose gradualmente según aumente el factor de sobrecarga.
- c) Si $\gamma H/c > 6$, la condición de estabilidad es crítica y las paredes de la excavación tienen un alto riesgo de falla.

En base a esta última condición de la generación del estado plástico de esfuerzo en la arcilla; se puede manejar el estado límite en función de un factor de seguridad que se calcula como:

$$F.S. = \frac{6c}{\gamma H}$$

Capítulo 7

PROCEDIMIENTO

CONSTRUCTIVO

DE LA

LUMBRERA

SELECCIONADA

7.1.- Introducción

7.2.- Problemas y objetivos

7.3.- Zonas de comportamiento

7.4.- Trabajos adicionales

7.5.- Procedimiento constructivo

7.1 INTRODUCCION

Este procedimiento se elaboró teniendo en cuenta la metodología de subexcavación y considerando que el procedimiento ejecutado detallado solo se podrá concentrarse a medida que se avance en los trabajos. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que los trabajos se realizarán dentro de un marco técnico con una secuencia ordenada y prevista y no como una sucesión de acciones necesarias, pero expuestas al desorden e improvisación.

Se debe admitir que el procedimiento seguramente se modificara y evolucionara de manera natural con el desarrollo del proyecto y de los avances que se vayan presentando tanto en la cimentación como la estructura de la Catedral y Sagrario Metropolitanos.

7.2 PROBLEMAS Y OBJETIVOS

Mencionaremos brevemente los problemas y objetivos que se presentan durante los trabajos realizados tanto en la Catedral y el Sagrario.

Problemas:

Geotécnicos: Tomando como base los estudios geotécnicos realizados se establece que el programa de ambas construcciones radica esencialmente por un lado, en los asentamientos diferenciales acumulados desde el inicio de su construcción y por otro lado, debido a la diferencia de velocidades con que se presenta los asentamientos en algunas áreas específicas de ambos cuerpos, generados por las causas ampliamente tratadas en los estudios previamente mencionados.

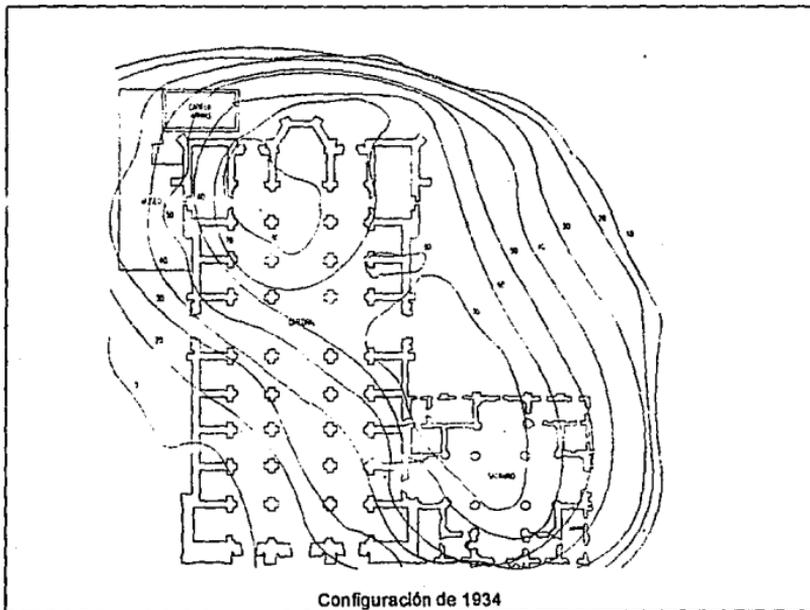
Estructural: Como consecuencia de lo anterior, hoy en día, un gran porcentaje de los muros y columnas presentan desplomes que pueden considerarse como inadecuados para su comportamiento estructural, sobre todo bajo sollicitaciones sísmicas.

Objetivos:

A corto Plazo: Consiste en corregir el comportamiento actual de la zona Norte para evitar que los hundimientos diferenciales sigan dañando la estructura.

A largo plazo: Llevar la Catedral a una condición geométrica que incremente la seguridad de la estructura haciendo que los desplomes de los elementos portantes sean admisibles. Como una primera alternativa para los objetivos a largo plazo se propone llevar a la Catedral a la configuración que tenía el año de 1934 (figura 7.1). Esto obedece a dos razonamientos principales.

- a) **Hundimiento Diferencial:** El fenómeno de hundimiento regional se inicia en los albores de 1900, manteniendo hasta aproximadamente 1938, una velocidad de asentamiento en la zona de la Catedral de 2.9 mm/mes. A partir de esta fecha la velocidad se incrementa a valores que fluctúan entre 11.1 y 14.6 mm/mes, que es del orden de 4.5 veces la velocidad inicial.
- b) **Primera recimentación:** En 1940 el Arq. Manuel Ortiz Monasterio realizó el vaciado de las celdas y el reforzamiento de contrarabes y construyen las criptas, rigidizando con ello la cimentación.



Configuración de 1934

figura 7.1

La duración de este proyecto, se tiene contemplado se realice entre enero de 1991 y octubre de 1995.

7.3 ZONAS DE COMPORTAMIENTO

Zonas de comportamiento:

Catedral

- 1.- Corresponde a la parte al Norte del crucero entre los ejes 1 a 5 y del A al F, en donde las áreas laterales integradas por las naves procesionales y los muros de contrarresto de la Catedral tienen una velocidad de asentamiento mayor que la zona central.
- 2.- A partir del eje 5 hacia el Sur, los desplomes presentan una tendencia común con dirección Sur-Oeste coincide con la configuración del piso.

Sagrario

- 1.- En el Sagrario se aprecia que los hundimientos diferenciales han producido un efecto de "Plato Invertido" en donde la zona central se hunde a menor velocidad que la periferia, siendo la esquina Sur-Este la que presenta mayor velocidad de asentamiento.

En la figura 7.2 se muestra la dirección de movimientos en el suelo de cimentación que se generan en cada etapa de subexcavación.

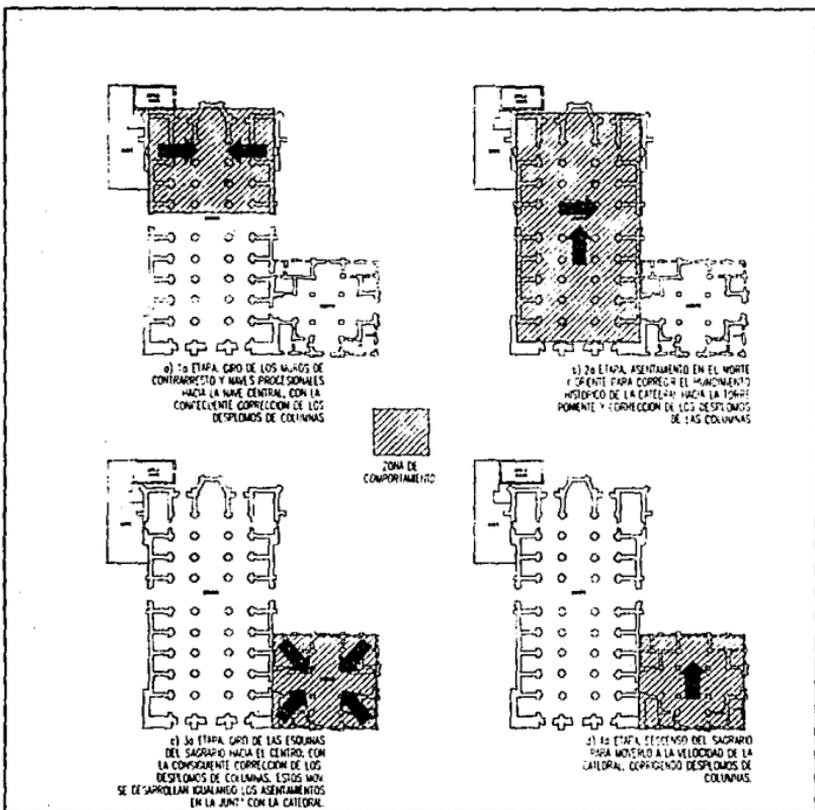


figura 7.2

7.4 TRABAJOS ADICIONALES

En cuanto a la construcción de lumbreras se tuvieron que realizar una serie de trabajos para asegurar la seguridad tanto de la estructura como del personal, lo cual llevó a apuntalar la estructura para mantenerla rígida y mantener los arcos en sus posiciones; cables que cruzan de un lado a otro desde las naves procesionales y por último se utilizaron pilotes para contrarrestar el hundimiento del Sagrario, colocados en la periferia de la Catedral, Sagrario y atrio Oriente.

- Apuntalamiento

Todo el sistema de apuntalamiento de la Catedral, cumple con 2 objetivos primordiales:

- a) Rigidización de la nave procesional para garantizar movimientos de corregido, al realizarse el descenso de las partes altas.
- b) Permitir de una manera segura todo el proceso de renivelación, evitando en lo posibles desprendimientos de elementos de los arcos formeros.

El funcionamiento del sistema de apuntalamiento ayudará a manejar los desplazamientos de las bóvedas impuestos por la subexcavación. Por otra parte, este apuntalamiento garantiza la estabilidad de la estructura de la Catedral entre cualquier eventualidad que llegara a suscitarse.

- Cables

Se colocaron tensores en el interior de la Catedral ante la percepción del tiempo necesario para el proceso y como medida de seguridad.

Se utilizaron un conjunto de cables que cruzan de un lado a otro desde las naves procesionales para tratar que la Catedral no tienda a abrirse por el centro y dañará tanto arcos como bóvedas.

- Pilotes

El refuerzo de la cimentación estará formado con pilotes de control que se apoyan en la capa dura, los 27 pilotes de fricción negativa y 64 nuevos pilotes de punta con funda.

La determinación del número de pilotes se basa en:

- a) Apertura de la junta entre la Catedral y el Sagrario para independizar a los edificios.
- b) Refuerzo de las cuatro esquinas del Sagrario, lo que permite controlar los hundimientos regionales diferenciales y las distorsiones asociadas al proceso de subexcavación.

7.5 PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO

LOCALIZACION DE LAS LUMBRERAS

Para la determinación del número de lumbreras y su localización, se calcularon los asentamientos inducidos a nivel del pedraplén, (utilizando los métodos propuestos por J. Alberro y E. Tamez), el número de lumbreras es de 30 y la ubicación se presenta en la figura 7.3.

Lumbreras:

- Exteriores: L-1, L-2, L-3, L-5, L-9, L-12, L-16, L-27, L-28 y L-30
- Interiores Catedral: L-4, L-6, L-7, L-8, L-10, L-11, L-13, L-14, L-15, L-17, L-18, L-19, L-21, L-23 y L-26.
- Interiores Sagrario: L-20, L-22, L-24, L-25 y L-29

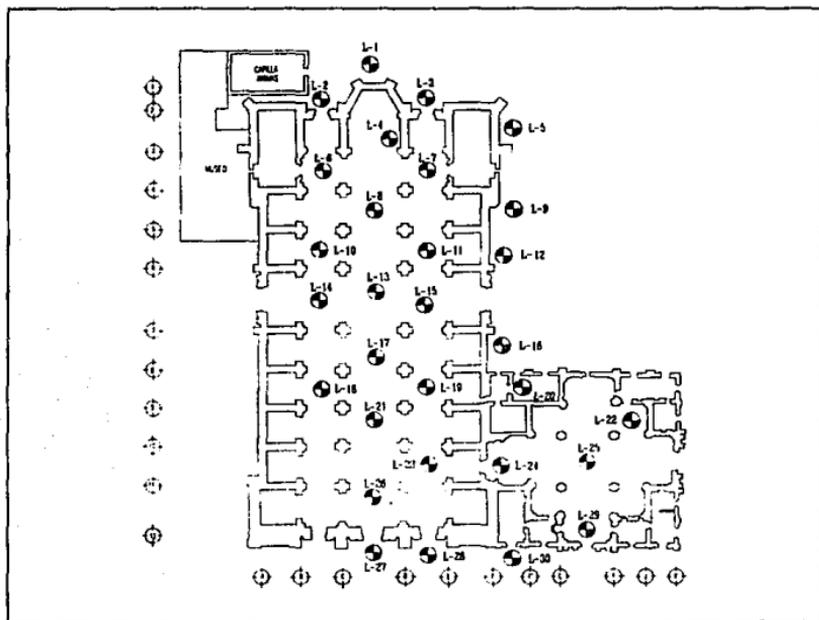


figura 7.3

DEMOLICION DEL PEDRAPLEN

La demolición del pedraplén se lleva a cabo por medio de rompedoras neumática manuales, las mismas que se utilizaron para la demolición de las losas de los pisos, el espesor del pedraplén varía de acuerdo con lo que ya hemos visto de 1 a 2 m en diferentes zonas, esto afecta al tiempo de ejecución del que se tenía planeado para cada una de las lumbreras (figura 7.5).

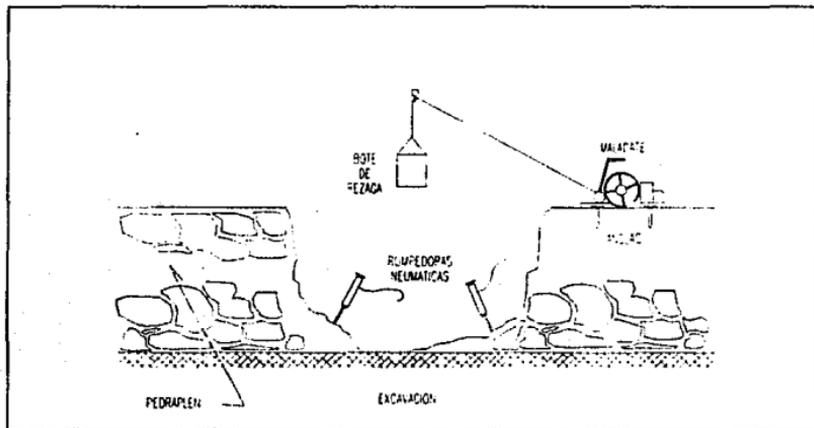


figura 7.5

EXCAVACION AL NIVEL FREÁTICO

Posteriormente a la demolición de las losas y el pedraplén, se continua la excavación a pico y pala hasta la profundidad del nivel freático (tabla 7.1), como ya vimos el nivel freático varía en cada lumbrera debido a diferentes causas ya expuestas. Durante la excavación se tuvieron ciertos problemas como son: los pilotes o estacones de madera que se utilizaron en la cimentación original de la Catedral y el Sagrario los cuales son extraídos y después son desechados o tirados a la basura, también se pueden encontrar pilotes de los trabajos realizados durante las dos recimentaciones que tuvieron anteriormente en este siglo y otro factor que pudiese tomarse en cuenta como problemas durante su excavación fue el encontrarse con restos prehispánicos por lo que tuviera que suspenderse los trabajos de excavación durante periodos prolongados hasta que se estudiaran y decidir que hacer.

En cada una de las lumbreras se colocó un malacate accionado por un motor eléctrico de 2 ton, los cuales son anclados a los pisos, en donde se localiza cada lumbrera, para elevar el material del fondo de las lumbreras con la ayuda de un bote de rezaga, hasta el nivel de criptas, en caso de las lumbreras interiores; y posteriormente se traslada el material con carretillas hasta donde se encuentra otro malacate en la periferia de la Catedral que lo lleva a nivel del atrio y después trasladarlo al atrio Oriente de la Catedral donde es colocado todo el material extraído; para las lumbreras exteriores el material extraído solo se traslada al atrio Oriente.

Una semana antes de que la excavación llegue al nivel freático deberá iniciarse la operación del sistema de bombeo evector para ir abatiendo el agua simultáneamente y de manera programada respecto al avance de la profundidad de excavación, con objeto de evitar en lo posible la extracción excesiva de agua.

CONSTRUCCION DE POZOS DE BOMBEO

Después de la excavación hasta el nivel freático de las lumbrera se procede a instalar un sistema de bombeo.

A partir de los resultados de los sondeos de cono eléctrico se precisó para cada una de las lumbreras la profundidad de subexcavación. Esta definición conlleva a la necesidad de profundizar los pozos de bombeo de 20 a 26.5 m en promedio, medidos desde el nivel de feligresía.

Durante los trabajos de perforación de pozos de bombeo se han producido problemas de estabilidad en las paredes, al atravesar un estrato de arena de la costra superficial que subyace a los rellenos, cuya sedimentación en el fondo dificulta y en muchos casos impide su limpieza.

Una vez que se haya concluido la excavación a nivel freático se procederá a la construcción de 4 pozos de bombeo por lumbrera, ubicados en la excavación. La perforación de estos pozos se hará con broca de aletas y circulación de agua; bote cortador o tubo perforador en diámetro de 8" y una profundidad de 4 m por debajo del nivel máximo de excavación.

Se deberá lavar el pozo hasta que el agua de retorno se encuentre limpia (libre de todo y arena)

Posteriormente se colocará en la perforación, el ademe ranurado, el ademe estará constituido por tubería PVC de 4" de diámetro ranurado a partir de donde se localice el nivel freático hasta el fondo de la perforación y ciego en las partes superiores tendrá una cubierta de malla plástica tipo mosquitero y está confinado por un filtro de gravilla de 3/8" como diámetro máximo, colocado en el espacio anular entre el ademe y la pared de la perforación.

El ademe en el tramo comprendido entre el nivel freático y el fondo tendrá ranuras de 1 mm espaciadas 10 mm entre sí.

Antes de instalar el ademe y el filtro, en cada perforación deberá circularse agua a baja presión para retirar la arcilla que halla depositado en el fondo o se encuentre en suspensión.

Cada pozo ya ademado, será equipado con 4 puntas eyectoras con tuberías de inyección de 3/4" y retorno de 1", con la succión colocada a 30 cm del fondo del ademe.

Las puntas eyectoras de pozos colindantes serán conectadas al sistema general de inyección de agua a presión y retorno al carcamo formado por tuberías galvanizada de 76 mm de diámetro de regulación accionado por una bomba centrífuga horizontal de motor eléctrico de 15 HP.

Para la conducción del agua extraída del subsuelo producto del abatimiento del nivel freático se instalarán sistemas de bombeo auxiliares, descargando en uno o varios puntos a la red municipal de drenaje (conectadas a una red de tuberías que descarguen en el exterior en un régimen de drenaje, figura 7.6).

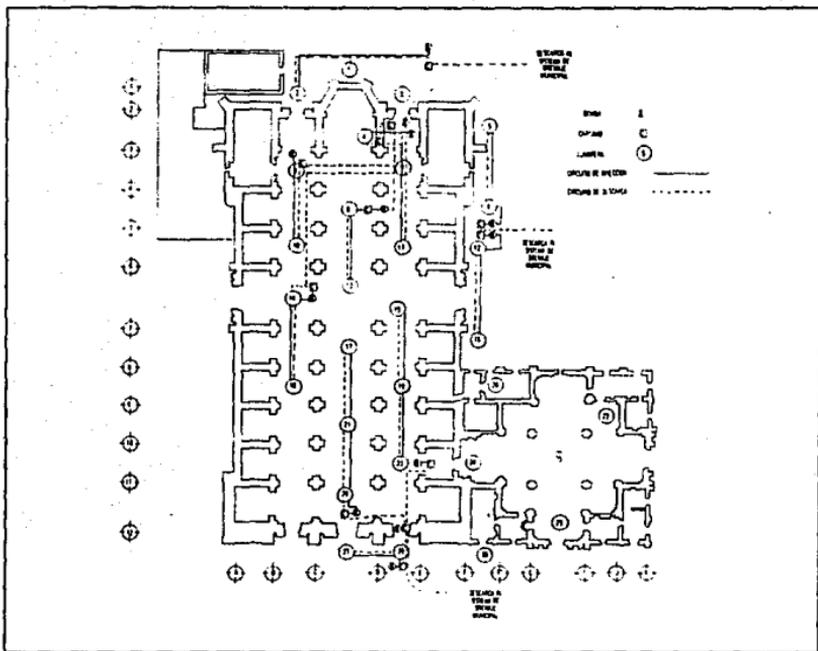


figura 7.6

El sistema opera por zonas, las lumbreras comprendidas en cada una de ellas se listan enseguida:

- a) Zona Norte: L-1, L-2, L-3, L-4, L-6, L-7, L-8, L-10, L-11 y L-13 (zona comprendida entre el Abside y el crucero).
- b) Zona Sur: L-14, L-15, L-17, L-18, L-19, L-21, L-23, L-26, L-27 y L-28 (zona de la Catedral entre la portada y el crucero).
- c) Sagrario: L-20, L-22, L-24, L-25, L-29 y L-30.
- d) Zona del atrio oriente L-5, L-9, L-12 y L-16.

El orden de funcionamiento es el siguiente: se inicia con operación del sistema de bombeo en la zona Norte de la Catedral; cuando el colado del revestimiento definitivo de las lumbreras de esta área, haya alcanzado el nivel original del espejo de agua, se suspende el bombeo y se inicia en la zona Sur y así sucesivamente continuando con el Sagrario, para finalizar con la zona del atrio Oriente.

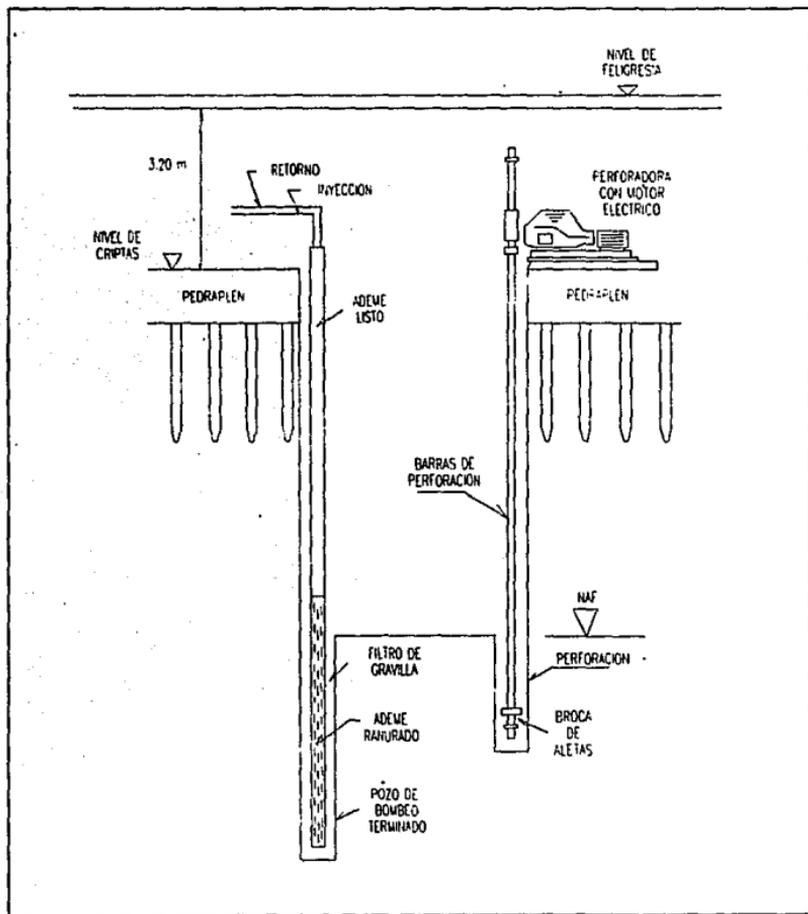
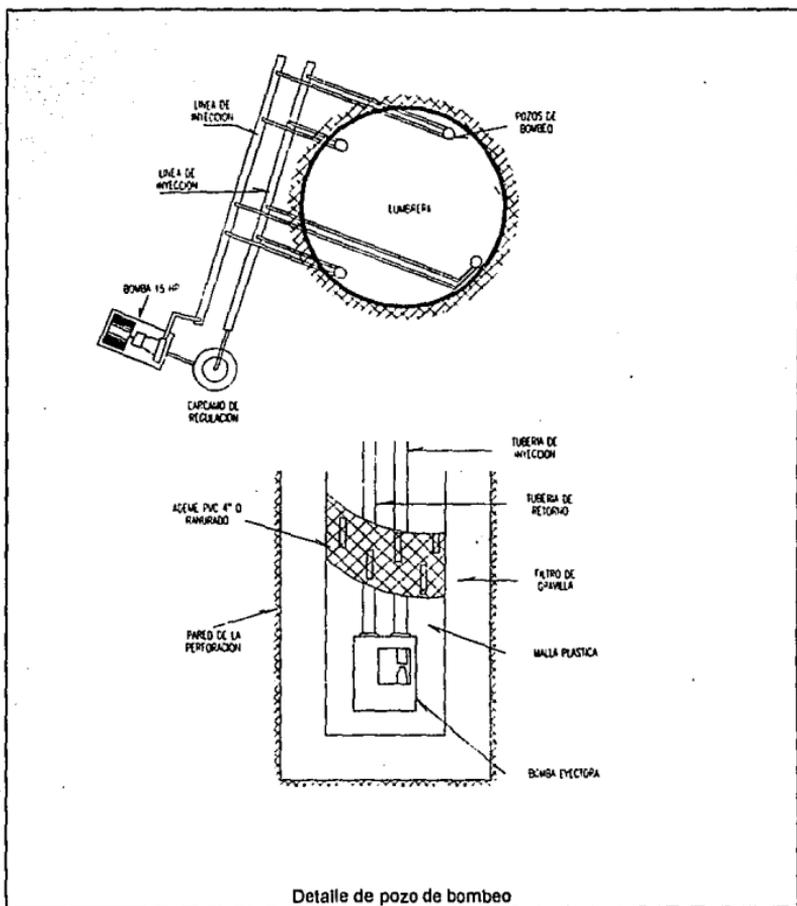


figura 7.7



Detalle de pozo de bombeo

figura 7.7'

EXCAVACION MANUAL DE POZOS

En cuanto se tenga instalados el sistema de bombeo, se continuara con la excavación manual por debajo del pedraplén utilizando pico y pala en tramos de 1m (figura 7.8).

Durante la excavación de la lumbrera para poder tener acceso al fondo se hicieron escaleras marinas hechas con varilla, cuando ya era considerable su profundidad se le construyeron anillos también de varilla sobre toda la longitud de la escalera.

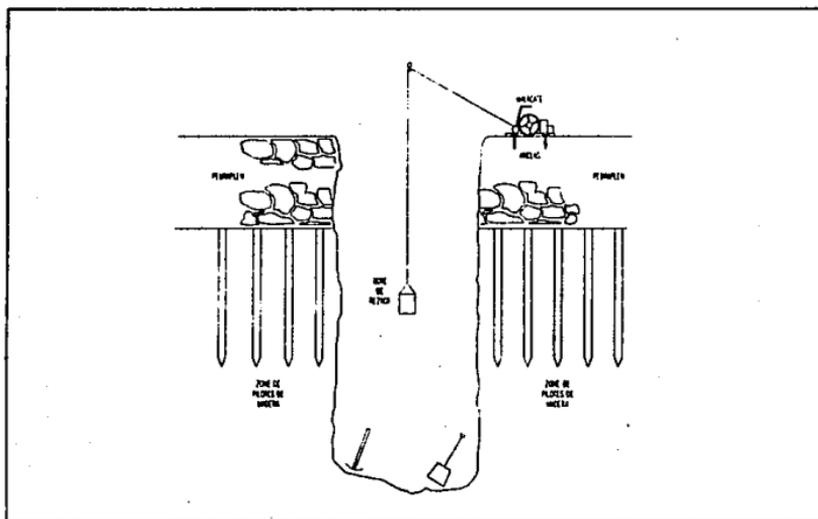


figura 7.8

REVESTIMIENTO PRIMARIO

Al finalizar cada tramo de 1 m de excavación por debajo del pedraplén, se procederá a afinar la pared de la lumbrera y a colocar una malla electrosoldada 6-6 X 10-10 y $f_y = 6\ 200\ \text{kg/cm}^2$ con separadores que la ubiquen a 3.5 cm de la pared. Inmediatamente después se lanzará una capa de concreto de $f_y = 150\ \text{kg/cm}^2$ y de 7.5 cm de espesor que formará el revestimiento primario de la lumbrera (figura 7.9).

La secuencia de excavación y revestimiento primario se continuará hasta alcanzar el nivel máximo de excavación de la lumbrera (tabla 7.1).

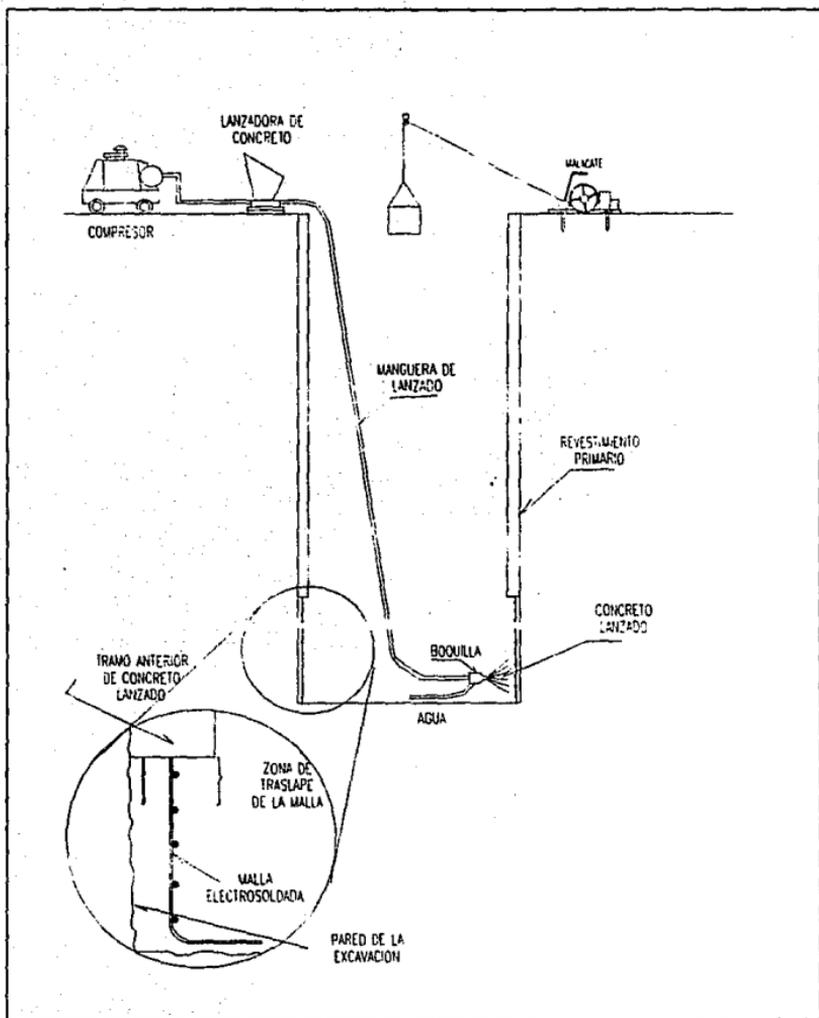


figura 7.9

PROFUNDIDAD DE LAS LUMBRERAS

En la metodología de subexcavación se requiere previamente identificar confiablemente para cada lumbrera la posición de los estratos blandos que se podrán excavar para mayor efectividad de la tecnología, es por ello se realizan por cada lumbrera un sondeo de cono eléctrico (SCE). Algunos de estos sondeos deberán repetirse para detectar los cambios temporales de resistencia y comprensibilidad que experimenten los estratos de suelos blandos; así mismo realizarse algunos sondeos para la recuperación de muestras inalteradas que permitan determinar su comportamiento y evolución.

Para precisar los niveles constructivos de las lumbreras, en la siguiente tabla se citan las profundidades de excavación y posición del nivel freático referidas al nivel del brocal; así como la longitud de las patas.

Niveles constructivos de las lumbreras (figura 7.10):

Profundidad máxima de excavación: La profundidad máxima de excavación para las lumbreras de la Catedral, medida desde el brocal, varía entre 12.25 y 26.05 m los valores se listan en la tabla 7.1.

Nivel Freático: La posición media estacional del nivel freático medida desde el brocal de cada lumbrera se presentan en la tabla.

Longitud de patas: Para simplificar los niveles constructivos y puesto que la única junta de colado que se tendrá, se ubica en el desplante de la losa de fondo, la dimensión para cada una de las lumbreras, entre el fondo de la excavación y el desplante de esta losa, se especifica en la tabla.

LUMBRERA	COTAS		SUBEXCAVACION	PROFUNDIDAD MÁXIMA DE EXCAVACIÓN (m)	LONG. DE LA PATA DE LA LUMBRERA (m)	NIVEL FREÁTICO (m)
	PELIGROSIDAD ATRIO	CRISTAS				
L-1	2233.497	--	17.50	20.55	2.50	7.80
L-2	2233.471	--	17.40	20.45	2.50	7.00
L-3	2233.399	--	16.70	19.75	2.50	7.80
L-4	--	2230.756	16.90	20.45	3.00	4.33

LUMBRERA	COTAS		SUBELEVACION	PROFUNDIDAD MÁXIMA DE EXCAVACIÓN (cm)*	LONG. DE LA PATA DE LA LUMBRERA (cm)**	FOYEL BRANCO (cm)
	FELIGRESÍA O ATRIO	CRIPTA				
L-5	2232.493	--	14.00	17.05	2.50	8.00
L-6	2233.215	2230.511	15.79	18.84	2.50	3.80
L-7	2233.092	2230.325	14.73	18.28	3.00	4.53
L-8	--	2230.270	15.70	18.75	2.50	4.92
L-9	2232.486	--	15.20	18.25	2.50	7.10
L-10	2232.658	2229.833	15.60	18.73	2.50	4.18
L-11	2232.726	2229.990	13.46	16.51	2.50	4.26
L-12	2232.846	--	16.20	14.25	2.50	7.10
L-13	2232.619	2229.700	12.78	15.83	2.50	4.08
L-14	2232.199	2229.354	11.66	14.21	2.00	4.16
L-15	2232.468	2229.755	12.79	15.34	2.00	4.29
L-16	2232.921	2232.942	17.40	19.95	2.00	8.00
L-17	--	2229.178	11.70	14.8	2.00	4.27
L-18	22341.486	2228.784	10.20	12.25	1.50	4.60
L-19	2232.117	2229.418	11.70	14.55	2.00	4.30
L-20			Sótano	14.45	-	-
L-21	--	2228.871	11.20	13.25	1.50	4.36
L-22			Feligrésia	20.95	-	-
L-23	2231.884	2229.176	12.29	14.34	1.50	4.79
L-24			Feligrésia	21.55	-	-
L-25			Feligrésia	26.05	-	-
L-26	2231.509	2228.830	12.02	14.07	1.50	4.32
L-27	2231.456	--	15.80	17.85	1.50	6.94
L-28	2231.799	--	19.90	16.95	1.50	7.50
L-29			Feligrésia	22.15	-	-
L-30	2232.496	--	15.80	17.85	1.50	8.00

* Las medidas de las profundidades máximas de excavación están referidas al brocal de cada lumbrera.

** Las medidas de las patas de las lumbreras están referidas a partir del fondo de la lumbrera hacia arriba.

tabla 7.1

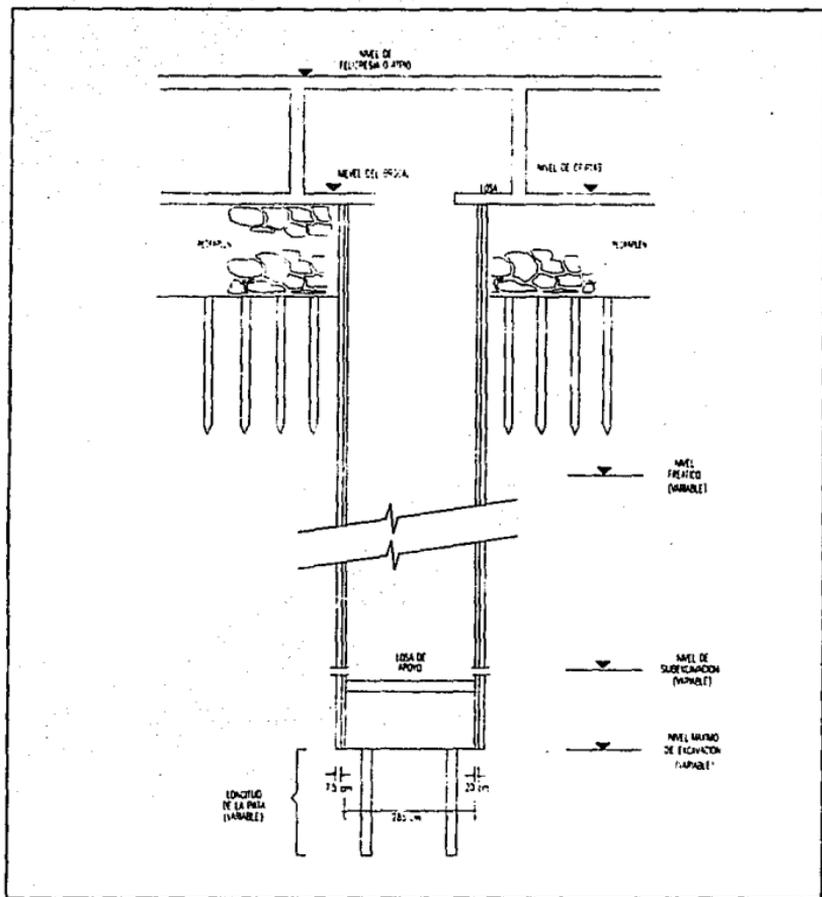


figura 7.10

IMPERMEABILIZACION

El sistema de impermeabilización empleado, consiste en la utilización de los siguientes productos y se recomienda una alternativa utilizando un sistema de impermeabilización por cristalización, con las siguientes características.

- 1.- Producto XIPEX MODIFICADO
- 2.- Producto XIPEX CONCENTRADO
- 3.- Producto XIPEX PATCH'N PLUG

Para la impermeabilización por cristalización se requieren de los productos XYPEX MODIFICADO Y CONCENTRADO, que al aplicarse directamente sobre la superficie del concreto, se forman cristales insolubles al agua, que penetran por los poros del concreto, disminuyendo notablemente su permeabilidad. Para atacar entradas de agua puntuales, se aplica el producto XIPEX PATCH'N PLUG.

Se impermeabiliza desde el fondo de la lumbrera hasta 1.5 m por encima de la posición del nivel freático; con el propósito de absorber las variaciones del nivel en épocas de lluvias y estiaje. Durante los trabajos se efectuó un seguimiento que es el que se presenta a continuación.

- a) Efectuar en el concreto lanzado el taponamiento de las salidas locales de agua con XIPEX PATCH'N PLUG,
- b) Sobre el concreto lanzado aplicar una capa XYPEX MODIFICADO,
- c) Esparcir XYPEX CONCENTRADO en la junta fría entre la losa de fondo y el muro perimetral con el fin de adherir ambos concretos; y
- d) Sobre el concreto lanzado aplicar dos capas de XIPEX CONCENTRADO,

Trabajos:

- a) Consiste en la colocación de andamios hasta 4.40 m de altura, y la iluminación de la zona.
- b) Identificación de las fisuras y oquedades sobre el muro de concreto, localizadas en su mayoría a nivel del estrato permeable arenoso; se inició la reparación, sellado y taponeo de las salidas críticas de agua utilizando el taponado XYPEX PATCH'N PLUG. (con una fuerza de trabajo de 2 cuadrillas de impermeabilización y un ayudante general; aplicando un volumen total de 44.40 lts. de taponados).

Se recomienda aplicar una capa de XYPEX MODIFICADO sobre dicha superficie, a fin de evitar escurrimientos de aguas freáticas y materiales contaminantes (partículas de polvo, humedad excesiva, eliminación de material suelto, etc.), brindando mejores condiciones de trabajo durante el colado y obteniendo un fraguado homogéneo del concreto estructural de la pared definitiva de la lumbrera, facilitando además la penetración uniforme de los cristales inducidos por el XYPEX

- c) Se inicia el proceso de aplicación de dos capas de XYPEX MODIFICADO, principiando con la aplicación de un chorro de agua a presión sobre las paredes de la lumbrera, con objeto de limpiar la superficie de trabajo y al mismo tiempo de proporcionar la situación de humedad necesaria para la adecuada integración del producto con el concreto.

Resultados.

- I) Se logro el control absoluto de las salidas de agua, pese a la presencia de huecos de tamaño considerable (15-20 cm de diámetro).
- II) Se considera que la capa aplicada de XYPEX MODIFICADO sobre la pared provisional de concreto lanzado, brinda la impermeabilidad necesaria correspondiente a esta etapa constructiva de la lumbrera (previa al colado de la pared definitiva).
- III) Los rendimientos obtenidos durante la aplicación de la muestra, se vieron afectados en cierta medida por las actividades para el habilitado y movimiento de andamios; los escurrimientos eventuales de la zona de bombas hacia el interior de la lumbrera; el suministro de agua limpia desde el exterior y el movimiento de la instalación de iluminación, los cuales son inherentes al proceso de obra.

REFUERZO DEL REVESTIMIENTO DEFINITIVO.

El refuerzo del revestimiento definitivo estará integrado por varillas del # 3 colocadas en una red de 20 X 20 cm tanto sobre la losa de fondo como sobre el revestimiento primario de la lumbrera. El acero de refuerzo será de $f_y = 4,200 \text{ kg/cm}^2$ y los traslapes deberán cubrir 40 diámetros como mínimo figura 7.11.

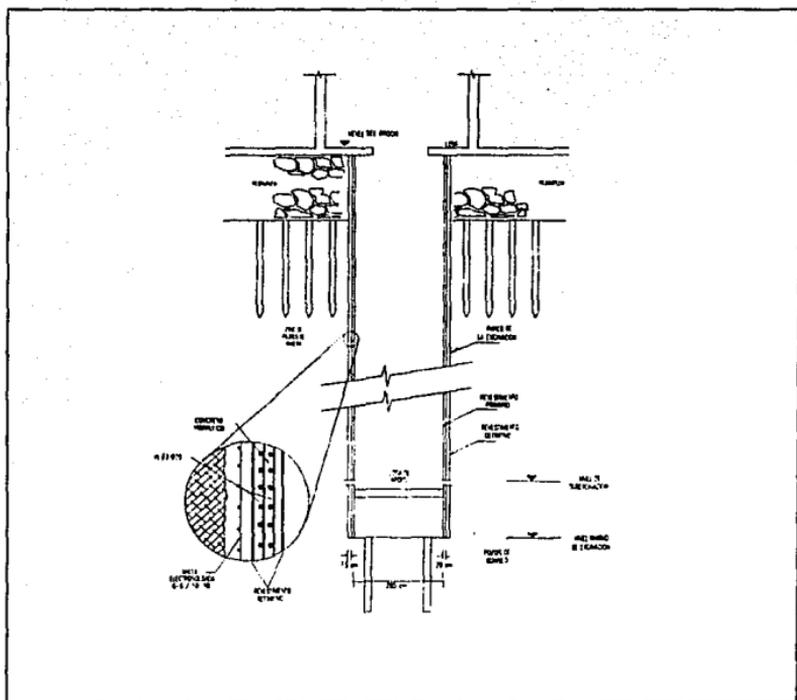


figura 7.11

COLADO DEL PRIMER TRAMO DE REVESTIMIENTO DEFINITIVO.

A partir del fondo de la excavación se habilitará y colocará el acero de refuerzo integrado por una doble parilla de acero (reticular) de varillas del # 3 con $f_y = 4\ 200\ \text{kg/cm}^2$ con separación de 20 cm y la cimbra que tendrá 2.85 m de diámetro exterior, de tal manera de formar un muro de concreto armado perimetral de 20 cm de espesor.

Para el colado se empleará concreto de $f_c = 250\ \text{kg/cm}^2$, con revestimiento de 20 cm; agregados con tamaño máximo de 20 mm y fraguado normal.

COLADO DE LA LOSA DE FONDO.

La losa de fondo de las lumbreras se ubicará sobre el primer tramo de revestimiento definitivo, para lo cual, se colocará una cimbra perdida de madera troquelada sobre el fondo de la excavación y encima de ella se habilitará y colocará el acero de refuerzo integrado por un doble lecho de varillas del # 6, en una retícula de 20 cm de separación en ambos sentidos.

El espesor de la losa será de 30 cm y el recubrimiento del acero de refuerzo de 5 cm. Se utilizará concreto de $f_c = 250 \text{ kg/cm}^2$, agregados de 20 mm, revestimiento de 20 cm y fraguado normal.

Integrado a la losa de fondo se dejará un tramo de tubería galvanizada de 2" de diámetro que comunicará la cámara que se formara bajo la losa con el exterior.

COLADO DEL REVESTIMIENTO DEFINITIVO.

El colado continuo del revestimiento inicia en el fondo de la lumbrera. Para transportar el concreto desde la superficie hasta la cimbra deslizando, se utilizará una manguera flexible del tipo "trompa de elefante", con un diámetro de 15 cm; a esta manguera a la mitad de la profundidad se le da una vuelta siguiendo las paredes formando una hélice, evitando así totalmente los posibles problemas de segregación.

Se procede al armado del fuste de la lumbrera, enseguida se instala la cimbra deslizando, para realizar el colado de la parte del fuste comprendida entre el límite de excavación y la losa de fondo, que se efectuará a una velocidad aproximada de 1 cm/minuto (60 cm/hora).

Se extrae la cimbra deslizando, para continuar con la instalación de la cimbra perdida de madera que se utilizara en el colado de la losa de fondo; inmediatamente después se coloca el acero de refuerzo y se realiza el colado.

Se instala nuevamente la cimbra deslizando, continuando con el colado del fuste a una velocidad de avance de 1 cm/minuto.

Juntas frías: Se tendrán 2 juntas frías, entre las patas y la losa de fondo y el fuste de la lumbrera. Ellas se trataran esparciéndoles el producto XIPEX CONCENTRADO.

Con el objeto de lograr un colado integral del revestimiento definitivo, se empleará para este caso el procedimiento de cimbra deslizante, lo que permitirá eliminar los problemas de las juntas de colado.

La cimbra deslizante será diseñada y construida de acero; el colado será continuo hasta terminar toda la longitud de la lumbrera, esto llevará que los colados duren de 12 a 24 hrs. el colado es en sitio con una revoladora de un saco y transportado el concreto con carretillas hasta la lumbrera.

Al mismo tiempo se fue vibrando con una vibradora electrica.

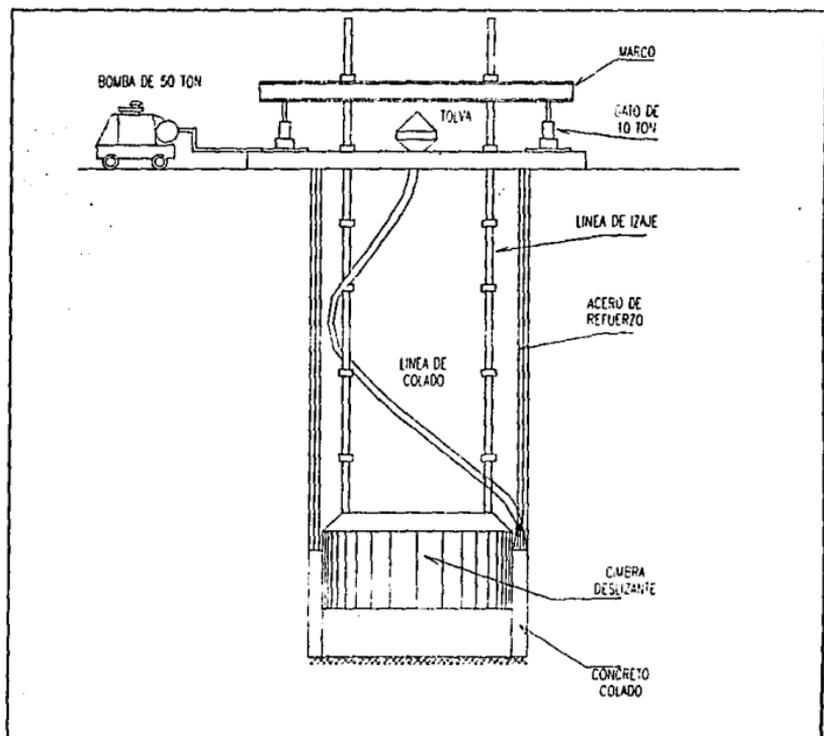


figura 7.12

CONSTRUCCION DEL BROCAL

El brocal esta construido con tabique rojo recocido se iniciará a 8.5 m de profundidad (para evitar infiltraciones del nivel freático), medidos desde el brocal de la lumbrera; se refirzará con castillos y dalas dispuestas a cada 2.5 m en el arranque del pedraplén y donde se tiene la corona del muro del solano.

BOQUILLAS PARA LAS RADIACIONES DE SUBEXCAVACION

Las boquillas estarán formados por un tubo de acero cédula 40 de 60.0 cm de longitud y 12.7 cm de diámetro, con un tapón roscado de acero de 13.3 cm de diámetro exterior y 12.7 cm de interior, que en su parte superior cuenta con una pieza hexagonal para apretar el tapón. La instalación inicia con la colocación de los preparaciones dejadas en el concreto hidráulico, consistentes en tubos de PVC de 15.2 cm de diámetro rellenos de yeso; terminado el colado se hace la limpieza para proseguir con la excavación horizontal de 60.0 cm, continuando con la colocación y alineación del tubo de acero. Desde que se deja la preparación del tubo PVC con yeso se colocan con una inclinación de 20° con respecto a la horizontal que deberán quedar alineados perfectamente con el centro de la lumbrera. El espacio anular entre el concreto y la boquilla se llena con un sello impermeable, se empleará XIPEX PATCH'N PLUG.

Al proceder físicamente a la instalación de boquillas para subexcavación, el acero de refuerzo del revestimiento definitivo constituyo un obstáculo en algunas posiciones modificándose ligeramente el número de radiaciones. Estas pequeñas reducciones, generan un efecto prácticamente despreciable en el calculo de los hundimientos de corrección; por lo que se pueden ignorar estas diferencias.

En la determinación del número de radiaciones por lumbrera se siguieron los dos criterios que a continuación se citan:

- a) Primeramente se utilizaron métodos analíticos (de J. Alberro y E. Tamez), para definir la influencia de asentamientos asociados a una perforación horizontal de 10 cm de diámetro y 6 m de longitud.
- b) El espacio físico para instalar las boquillas. De acuerdo con esto el número de radiaciones por cada lumbrera se especifica en la tabla 7.2 y se presenta en la figura 7.13.

NO. LUMBRERA	NO. DE RADIACIONES
4, 6, 7, 8, 10, 11, 13, 14, 15, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26 y 29	50
2, 3, 16, 27, 28 y 29	38
1, 5, 9 y 12	25 o 26

tabla 7.2

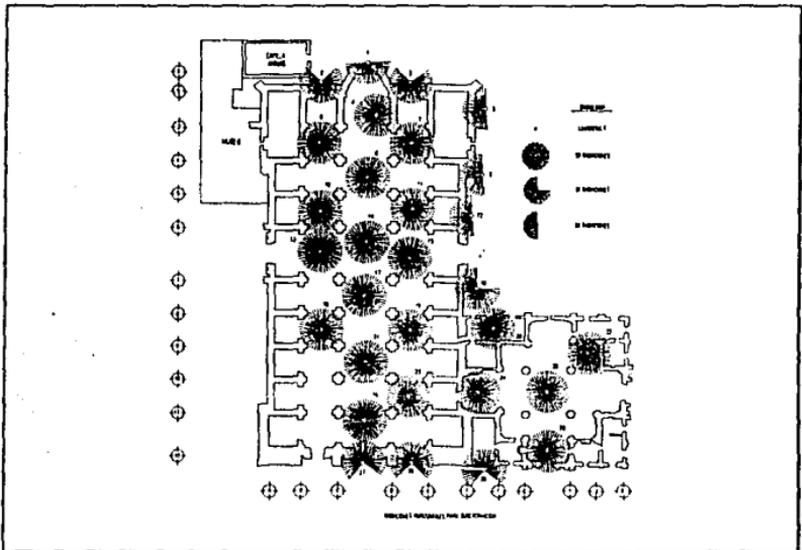


figura 7.13

En lo que respecta a la altura a la que deberán localizarse la boquilla, podrán tolerarse variaciones de 10 hasta 15 cm.

Desde las boquillas que se instalaron en el revestimiento definitivo de las lumbreras, se efectuaron las radiaciones para la extracción de arcilla, y generar los hundimientos correctivos de la geometría de la Catedral y el Sagrario Metropolitanos de la Ciudad de México.

INSTALACIONES ELECTRICAS Y DE VENTILACION

Para estar en posibilidad de ejecutar los trabajos de construcción de las lumbreras y posteriormente los de subexcavación, será necesario hacer la instalación de las redes eléctricas para el suministro de energía de cada uno de los sitios de ubicación de las lumbreras, incluyendo las necesarias para el alumbrado; así mismo se requerirá de un sistema de ventilación tanto en la Catedral como en el Sagrario.

Para la realización de ambos trabajos se contrato a empresas especializadas que se encargarán de elaborar los proyectos.

Por otro lado, los trabajos de demolición de las losas y pedraplén durante la construcción de las lumbreras requiere de la instalaciones para conducción de aire comprimido, a través de tuberías.

INSTALACION DE EQUIPO Y ESCALERAS

Escaleras

Las escaleras de caracol tiene un diámetro de 1.2 m, se fue construyendo en tramos de 2 m, primeramente se introdujo un tubo cédula 40 y que es sostenida con taquetes expansivos de 5/8" sobre el colado definitivo de la lumbrera.

Escaleras marinas: una de ellas se encuentra a 2 m del brocal, con anillos y la otra a 2.5 m del fondo de la lumbrera, esta es plegable para facilitar las maniobras de los trabajos de subexcavación.

La fabricación de la base de apoyo para la unidad de potencia hidráulica, de 1.33 m de lado y en forma de 1/4 de círculo (figura 7.14). El anclaje de la base hacia los muros de la lumbrera por medio de placas de acero de 20 cm de lado y 1/2" de espesor.

El equipo utilizado fue:

- 2.67 m de acero PTR de 3" x 3" calibre # 18
- 2.67 m de angulo de 1" x 1"

- 1.4 m² de rejilla Irving
- 8 taquetes expansivos de 4" x 5/8"
- 2 placas de acero de 20 cm de lado y 1/2" de espesor
- soldadura
- equipo de colocación

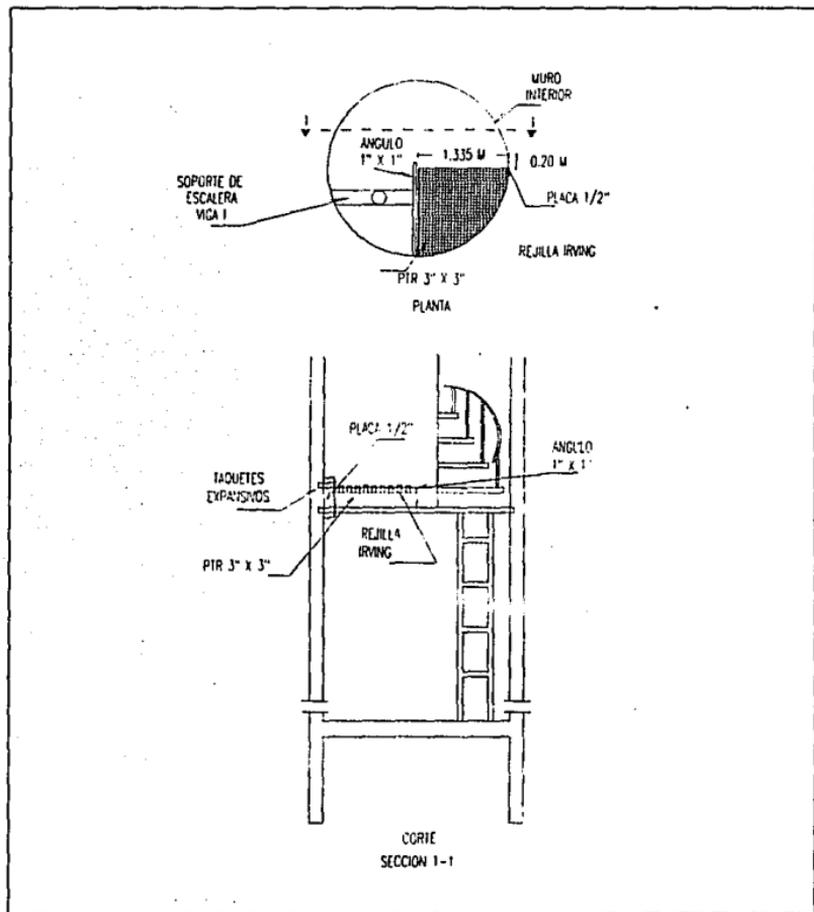


figura 7.14

FIRME DE CONCRETO EN EL FONDO DE LAS LUMBRERAS

Detrás de las acciones encaminadas a mejorar los trabajos de subexcavación, incluyendo la seguridad y presentación de los mismos, se ve la necesidad de cotar un pequeño firme de concreto sobre la losa de fondo de las lumbreras ya que presentan una superficie muy irregular lo que dificulta que se trabaje con limpieza, eficiencia y seguridad.

El firme sobre las losas será de concreto $f_c = 150 \text{ kg/cm}^2$ en un área de 6.4 m^2 por lumbrera y con un espesor del orden de 5 cm o el requerido para nivelar el piso, este último dato se verificará en obra durante la ejecución de los trabajos. Para que la superficie no quede resbalosa y tenga la rugosidad adecuada, se hará un rayado con cepillo; además, se le dará pendiente hacia los pasos de las puntas eyectoras para drenar el agua requerida para la limpieza o la que se introduzca por las boquillas de subexcavación.

También será preciso suministrarse agua por medio de una tubería del mismo diámetro que el de las puntas eyectoras, para efectuar la limpieza diaria del equipo.

LIMPIEZA DE SITIO

La limpieza de los pasillos en las criptas es constante durante toda la jornada de trabajo, es necesariamente tener limpias las instalaciones ya que esto es parte de la seguridad del personal, como también es necesario en general tener lo más limpio las instalaciones interiores y exteriores de la Catedral ya que es visitada a diario.

Dentro de las lumbreras es de primordial importancia tener en buenas condiciones las escaleras de acceso y la base de apoyo, hechas de acero; ya que las condiciones extremas como es el calor, humedad, falta de circulación de aire, etc. tienden a dañar las estructuras por lo que se recomendó utilizar pintura especial para evitar la corrosión, además deben pintarse a más tardar cada 8 días para mantenerlas en buen estado.

SISTEMAS DE SEGURIDAD

- Uso de casco obligatorio
- Zapatos especiales
- Anuncios

- Salida de emergencia
- Limpieza de sitios de trabajo
- Enfermería (Primeros auxilios)

CUBIERTA PARA PROTECCION

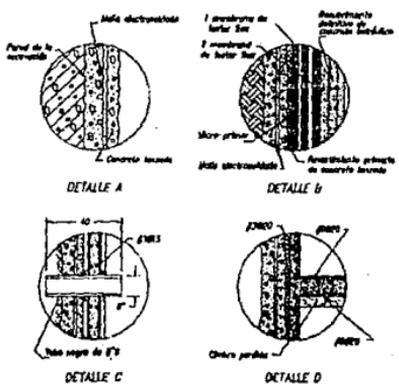
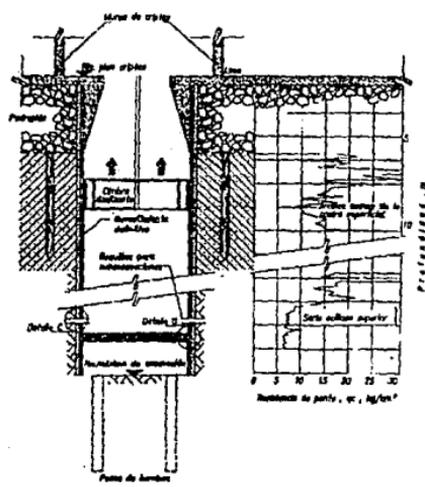
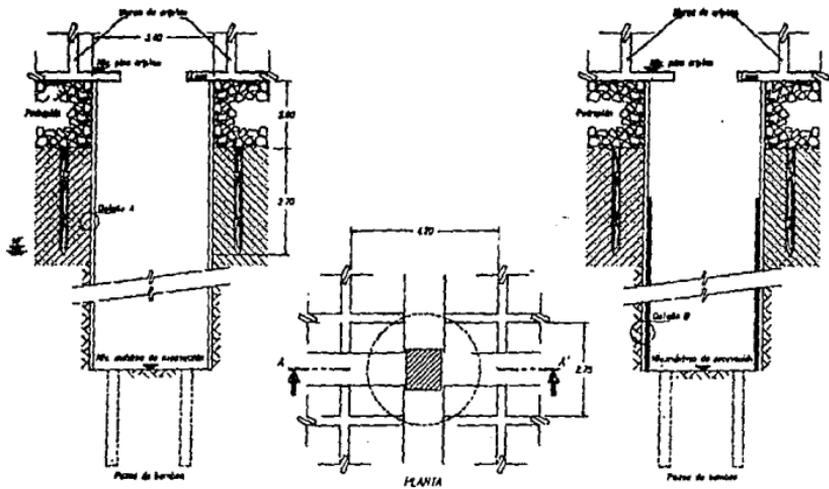
Interiores: Posteriormente a la construcción de los brocales se tuvo que hacer una cubierta al brocal, ya que los pasillos a nivel de criptas son muy angostos y obstruyen totalmente los pasillos y así permite el paso libremente en los pasillos, son rejillas Irving.

Exteriores: Se construyo un barandal de acero para la seguridad en las lumbreras.

PROTECCION A LAS CRIPTAS

Para la protección de las criptas se utilizo una malla de alambre sobre la superficie de las criptas.

Nota: En la figura siguiente se presenta esquematicamente y brevemente el procedimiento constructivo de una lumbreira.



Capítulo 8

PROCEDIMIENTO

DE

SUBEXCAVACION

8.1.- Introducción

8.2.- Identificación de las boquillas

8.3.- Equipo de subexcavación

8.4.- Personal de subexcavación

8.5.- Términos empleados en la subexcavación

8.6.- Metodología de subexcavación

8.7.- Controles para el procedimiento de subexcavación

8.8.- Etapas de subexcavación

8.1.- INTRODUCCION

La subexcavación tiene como objeto corregir los desniveles y desplomes de edificios, que han sufrido hundimientos diferenciales, mediante hacer descender las partes altas respecto a las bajas como consecuencia de la extracción lenta y controlada del suelo en que se apoya la cimentación.

En el caso de la Catedral y Sagrario Metropolitanos, se desarrolla con apoyo de un sistema de apuntalamiento preventivo, que controle alguna deformación imprevista y evite cualquier daño estructural.

El procedimiento de subexcavación en la Catedral y Sagrario se divide en cuatro etapas, en la primera etapa de subexcavación se modificarán las tendencias de los asentamientos diferenciales al Norte del crucero, frenando inicialmente el fenómeno actual de giro de las naves procesionales y muros de contrarresto hacia el exterior.

Posteriormente se Invertirá este efecto, obligándolos a girar hacia el centro de la nave central.

En la segunda etapa se tendrá como objetivo corregir los desplomes de muros y columnas, sin modificar la geometría actual de los de contrarresto; esto significa que tanto en el sentido transversal como longitudinal, los movimientos serán planeados para que la estructura responda como cuerpo rígido. Los desplazamientos, verticales que se inducirán con la subexcavación corresponde a una configuración de plintos intermedia a la que correspondía en 1934.

En el Sagrario, la subexcavación se realizará para lograr un efecto que invierta las tendencias actuales, cerrando la estructura hacia el centro.

En la segunda etapa como en las subsecuentes, los trabajos en la Catedral, se corregirán gradualmente según se vaya requiriendo.

El nivel de subexcavación se desarrollará a una profundidad promedio de 17 m a 25 m de acuerdo a la profundidad de cada lumbrera.

Por cada una de las lumbreras se realizan como máximo 50 perforaciones radiales, con 6.0 m de penetración (figura 8.1). En cada preparación dejada en las paredes de las lumbreras se dejó un ademe metálico de 12.7 cm de diámetro y con una longitud de 0.60 m, puesto en todas las boquillas de la lumbrera, con tapón roscado de 13.3 cm de diámetro.

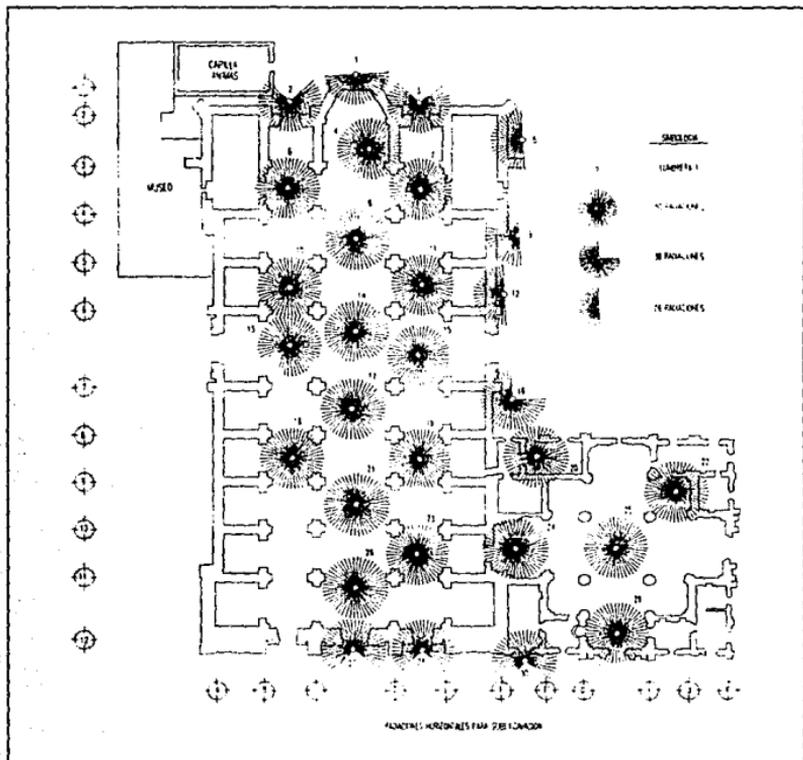


figura 8.1

8.2.- IDENTIFICACION DE BOQUILLAS

Con el fin de identificar la posición de las boquillas de las lumbreras se tomo como base de referencia un sistema cartesiano derecho, donde el eje de las abscisas es positivo en dirección Oriente y el eje de las ordenadas positivo en dirección Norte (figura 8.2).

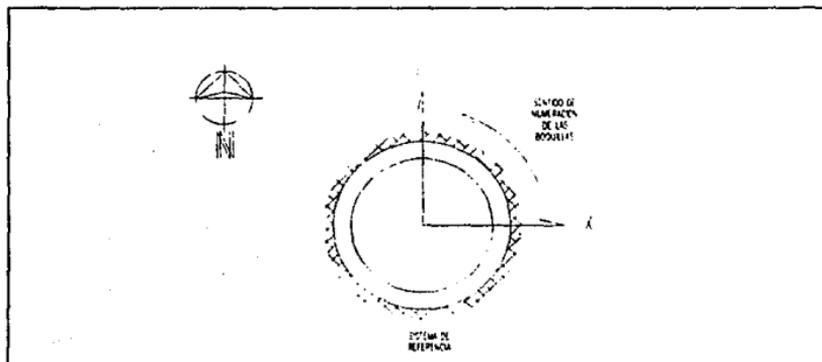


figura 8.2

Las boquillas están enumeradas comenzando por aquella que se ubique mas próxima al Oriente, con numeración progresiva en sentido contrario a las manecillas del reloj (figura 8.3).

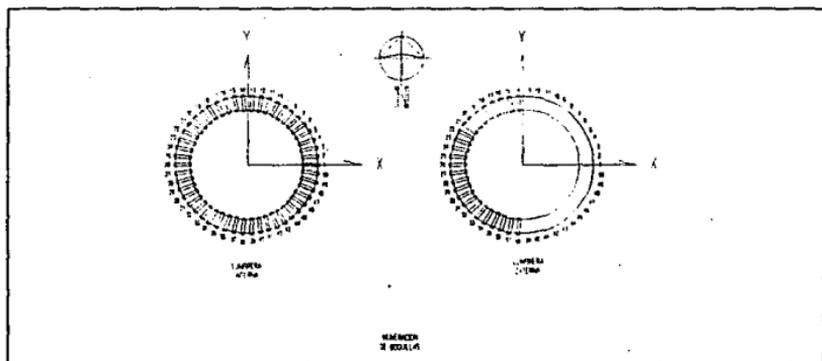


figura 8.3

Para las lumbreras que se encuentran localizadas en los atrios Norte, Oriente y Sur, en que solamente parte del diámetro cuenta con boquillas, su numeración se considera como una distribución virtual de boquillas uniforme en todo el diámetro con el número correspondiente a la primera físicamente colocada.

La identificación del número de la boquilla es de material plástico resistente a las condiciones ambientales propias del trabajo dentro de las lumbreras.

8.3.- EQUIPO DE SUBEXCAVACION

El equipo que se utiliza para la subexcavación consta de las siguientes partes:

- a) Mesa de subexcavación construida con placas y perfiles de acero A-36, con posición de 20° con relación a la horizontal.
- b) Gato hidráulico apoyado sobre la mesa de subexcavación fijado por medio de ocho tornillos y accionado por una bomba eléctrica que se localiza en la base próxima a la escalera marina que accede al fondo.
- c) Malacate eléctrico de 2.0 ton para el ascenso y descenso del equipo de subexcavación.
- d) Tubo subexcavador de 1 m.
- e) Zapata de acero afilada en el extremo que se hinca en el suelo acoplada mediante un conector (cabezote) al resto de la tubería.
- f) Tubería de perforación en tramos de un metro integrada por los coples, macho en un extremo y hembra en el otro, conservando los diámetros interior y exterior.
- g) Bombas (unidad de potencia hidráulica), con tanque de hidrogeno de 7.5 HP y 2.0 HP.
- h) Canastillas de acero para bajar y subir el tubo lleno y vacío de material.
- i) El escantillón es una barra de acero de 1.5 m de longitud montada en uno de sus extremos media esfera de PVC con diferentes diámetros (1" 2" y 3.5") respectivamente, para medir el cierre del barreno (figura 8.4).
- j) Basculas.
- k) Piston para extraer el material del tubo subexcavador.
- l) Bomba de agua.

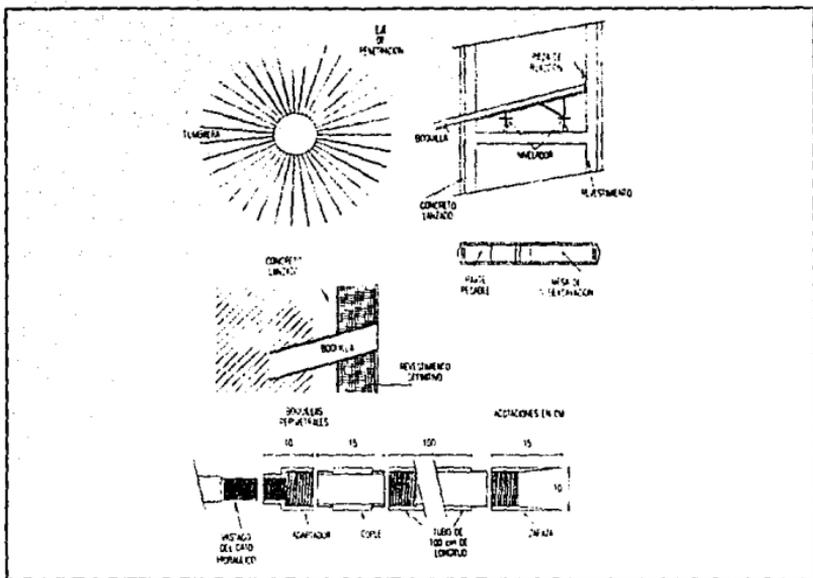


figura 8.4 Identificación del equipo

8.4.- PERSONAL DE SUBEXCAVACION

Con la finalidad de que los trabajos de subexcavación se realicen eficientemente, se capacitó al personal, impartiendoles clases de matemáticas básicas, manejo de equipo, herramienta y motivación personal.

Las edades del personal fluctúan entre 18 y 60 años, además de que se implementó un programa de alfabetización conjuntamente con personal del (INEA).

Para la subexcavación en una lumbrera se formarán brigadas integradas por cuatro personas que son las que maniobran las operaciones de subexcavación; una persona centra el pistón, otras dos personas acoplan la tubería, mientras que la otra les ayuda a operar la unidad de potencia hidráulica para penetrar o extraer el pistón; en el exterior de la lumbrera trabaja un malacatero para subir y bajar los tubos de subexcavación, además el mismo los traslada al área donde los pesan, extraen el material para tomar una muestra y son lavadas para ser regresadas

y continuar con la operación de subexcavación, además de los ingenieros que se encargan de la supervisión y control de los trabajos realizados.

8.5.- TERMINOS EMPLEADOS EN LA SUBEXCAVACION

- a) Penetración, es la acción de introducir en las boquillas el tubo subexcavador con el que se extrae la arcilla; la penetración puede tener una longitud variable entre 1,0 y 6,0 m.
- b) Pasada, consiste en el ataque de un número predeterminado penetración de todas las boquillas de penetraciones en un o diferentes lumbreras, especificando su longitud.
- c) Tramos de penetración, es el correspondiente al número de tubos hincados en cada penetración; para fines de referencia el primero es el que esta más alejado de la pared de la lumbrera (figura 8.5).
- d) Rendimiento, se define como el cociente que resulta de dividir el peso del material extraído por pasada entre el tiempo en que está se realiza, expresado este último en semanas integradas por seis días laborales.

Rendimiento = peso del material por pasada / tiempo en que se realiza (semanas)

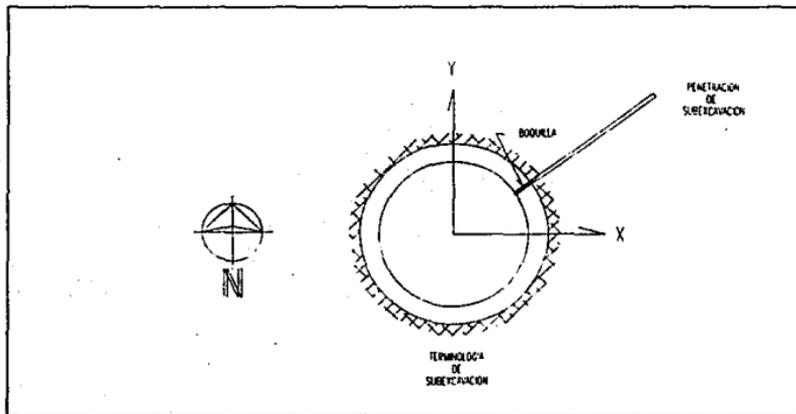


figura 8.5

8.6.- METODOLOGIA DE SUBEXCAVACION

Las etapas concernientes a un ciclo de subexcavación, se citan a continuación.

- 1) Colocación, nivelación y centrado de la mesa con relación a la primera boquilla.
- 2) Acoplamiento de la zapata, cabezote, cople y tubería de subexcavación (tubo perforador de 10 cm de diámetro que pasa por el interior del ademe), al cabezal del gato, para en seguida iniciar el hincado del primer tramo de tubería (figura 8.6-a, 8.6-b)
- 3) Alcanzada la máxima longitud de penetración, se comienza la extracción del tubo lleno arcilla; en seguida se desacopla el conector de la tubería y el gato, para posteriormente llevar el tubo al nivel de criptas y proceder a su pesaje, estableciendo el peso y volúmenes del material subexcavado.(figura 8.6-c).
- 4) Se acopla nuevamente dos tramos de tubo de 1.0 m; al final se retrae el tubo para pesarlo.(figura 8.6-d).
- 5) Así se continua hasta llegar a la longitud de 6.0 m. (figura 8.6-e); en caso de que se requiera subexcavar sólo un tramo de los 6.0 m, se colocará el ademe en posición y se procederá de la misma forma.
- 6) Una vez que se haya generado el cierre de la penetración (figura 8.6-f), se repite el ciclo.

Nota: La subexcavación se inició en la Zona Norte de la Catedral, desde el abside hasta el crucero, con objeto de generar desplazamientos que compensen un año de hundimiento regional.

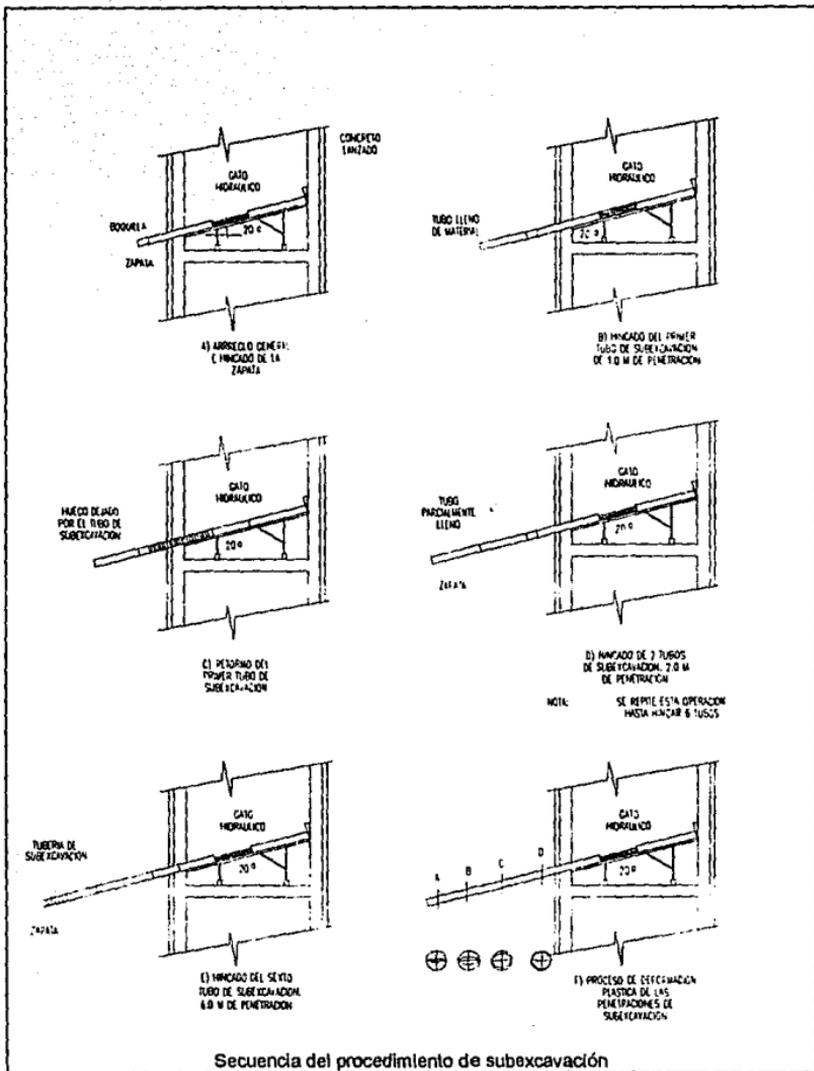


figura 8.6

La secuencia del proceso de subexcavación por medio de perforaciones se muestra en la (fig.8.7).

8.7.- CONTROLES PARA EL PROCEDIMIENTO DE SUBEXCAVACION

Volumen de subexcavación. Cada tramo de 1.0 m de tubo perforador lleno de arcilla se pesa y se anota en la hoja de registro, a este peso se le descuenta el peso del tubo perforador vacío (zapata y tubo) para obtener el peso neto de la arcilla.

El volumen se calcula apartir del peso volumetrico del material que se va progresivamente evaluando.

Laboratorio de mecánica de suelos. En la zona de criptas se ha acondicionado un área, para realizar pruebas índice en los materiales subexcavados, que son:

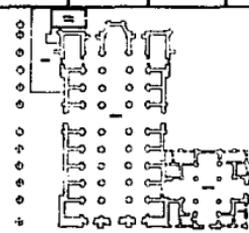
- Contenido natural de agua.
- Peso volumétrico.
- Límites de plasticidad.

Este laboratorio cuenta con el siguiente equipo para los ensayos:

- Horno de microondas.
- Balanza electrónica digital.
- Pamilla eléctrica.
- Recipientes refractarios.
- Mobiliario (dos escritorios, mesa de trabajo, librero, computadora y un pizarrón).

Registro de control. El peso y volumen subexcavado de cada lumbrera se lleva en un registro de campo como el que aparece en la tabla 8.1.

 tgc geotecnia sa			CONTROL DE SUBEXCAVACION				LUMBRERA No		HOJA No	
FECHA Y HORA	No. DE PENET.	LONG. DE ADEMÉ(m)	TRAMO DE PENETRACION No						TOTAL SUELO	
			1	2	3	4	5	6		
									TOTAL SUELO	
									TOTAL SUELO	
									TOTAL SUELO	
									TOTAL SUELO	
									TOTAL SUELO	
									TOTAL SUELO	
									TOTAL SUELO	
									TOTAL SUELO	
									TOTAL SUELO	
									TOTAL SUELO	
									TOTAL SUELO	

	JEFE DE BRIGADA
	LABORATORISTA
	SOBRESTANTE
	RESIDENTE

PESOS (kg)	
1.	TUBO + ZAPATAS + SUELO
2.	TUBO + ZAPATA
3.	SUELO
4.	RESISTENCIA (kg / cm ²)

tabla 8.1 Control de Subexcavación.

Medición del cierre. EL cierre es el desplazamiento vertical de la masa de suelo que se produce en la perforación del subsuelo por efecto del tubo perforador, y este se mide con un escantillón semiesférico de PVC montado en una tubería ligera de diámetro de 1" en tramos de 1.5 m con acoplamiento en sus extremos. Los escantillones son de (1", 2" y 3.5") que se acoplan a la parte extrema de la tubería.

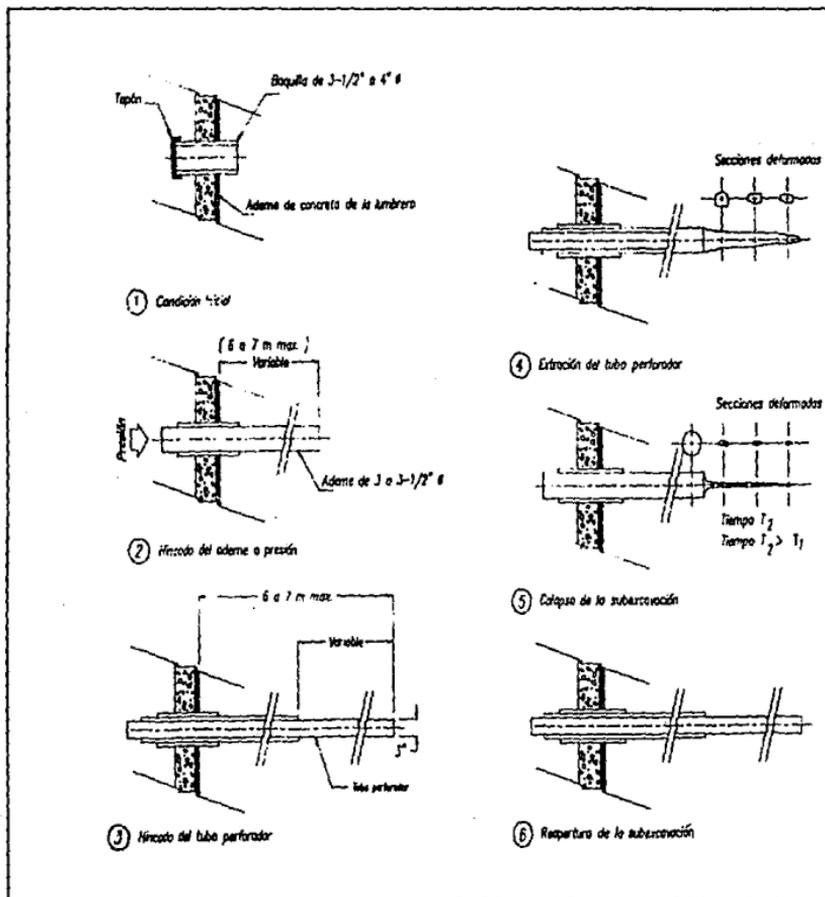


figura 8.7

Las operaciones de subexcavación se llevan a cabo hasta completar una pasada en todas las boquillas de la lumbrera. Terminada una pasada en todas las boquillas se procede a medir el cierre del barreno, con el escantillón.

El mismo personal mide el cierre longitudinal de subexcavación, en presencia de un ingeniero quien será el que tomara los datos medidos.

8.8.- Etapas de subexcavacion

En la figura 8.8 se presenta la comparación de la configuración de los hundimientos, obtenidos con los Metodos de análisis de J. Alberro y E.Taméz que presentará la Catedral en una primera pasada de subexcavación en todas las lumbreras a nivel del apoyo del pedraplén con el terreno de sustentación.

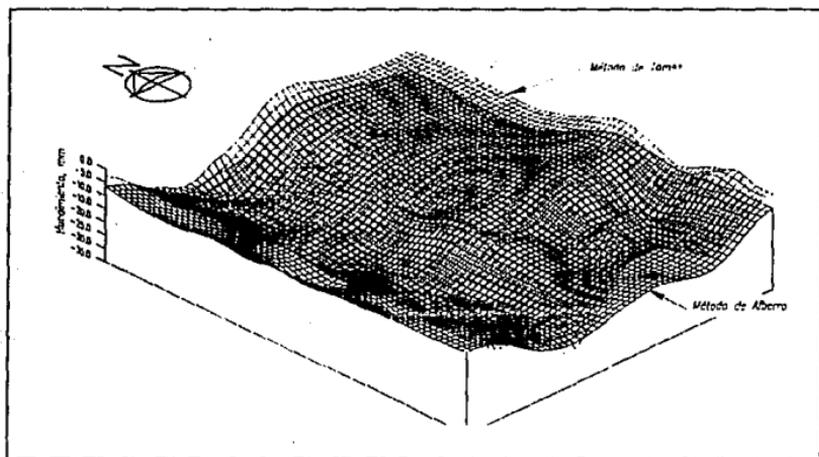


figura 8.8

PRIMERA ETAPA DE SUBEXCAVACION

La primera etapa de subexcavación consiste en inducir un hundimiento controlado de 10 mm en la cimentación de la Catedral, a la altura de la columna situada en la intersección de los ejes C-5, extrayendo arcilla de las lumbreras 8 y 10.

Lumbreras L - 8 y L - 10

La subexcavación se inicia en las cinco penetraciones de las lumbreras L-8 y L-10 más próximas a la columna C-5, comprendidas entre 210° y 240° (boquillas 30 a 34) y entre 30° y 60° (boquillas 8 a 12) respectivamente (figura 8.9)

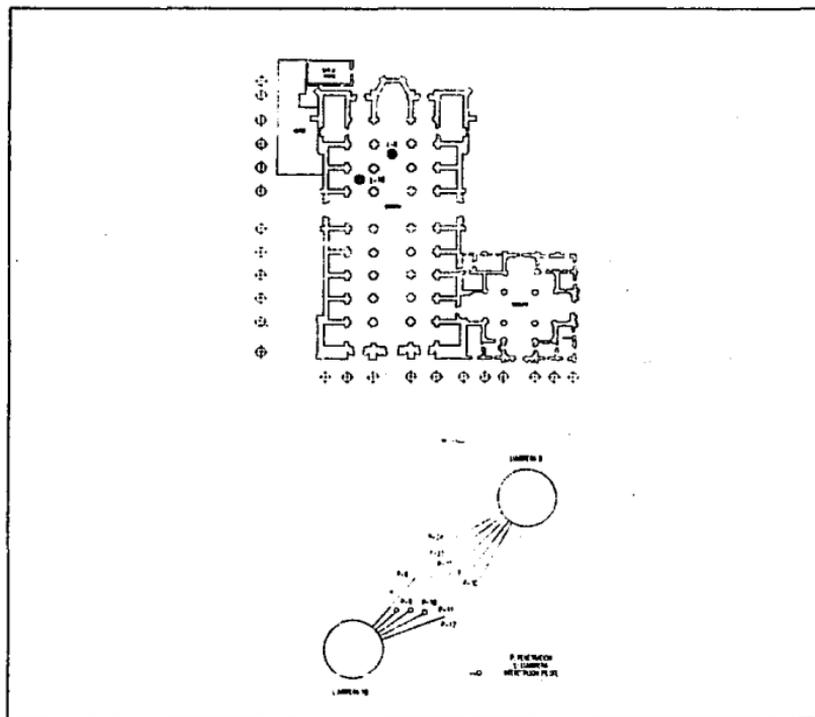


figura 8.9

Avance de subexcavación. En la (tabla 8.2) se presenta el avance diario de la primera penetración de la subexcavación. Las penetraciones tuvieron una longitud de 6 m, a excepción de aquellas que interceptaron pilotes de control, se subexcavarán de la 30 a 34 y de la número 8 a 12 en las lumbreras 8 y 10 respectivamente.

DÍA	L U M B R E R A 8				
	P-34	P-33	P-32	P-31	P-30
14 jun 93	1	-	-	-	-
15	-	1	-	-	-
16	-	5	3	-	-
17	1	-	3	-	-
18	4	-	-	4	-
19	-	-	-	2	1
20	-	-	-	-	-
21	-	-	-	-	5
Longitud	6m	6m	6m	6m	6m
LONGITUD TOTAL = 30					
DÍA	L U M B R E R A 10				
	P-12	P-11*	P-10*	P-9*	P-8
17 jun 93	4	-	-	-	-
18	2	2	-	-	-
19	-	1	-	-	-
20	-	-	-	-	-
21	-	0.70*	2.15*	1	-
22	-	-	-	1.15*	4
23	-	-	-	-	2
Longitud	6m	3.7m	2.15m	2.15m	6m
LONGITUD TOTAL = 20					

tabla 8.2. Primeras penetraciones de Subexcavación, en m.

Símbología: P penetración * intercepta pilote

Medición del cierre de las penetraciones

El cierre longitudinal de las penetraciones se midió con un escantillon semiesférico de PVC montado en una tubería ligera de diámetros de 1", 2" y 3.5", en tramos de 1.5 m con acoplamientos en sus extremos.

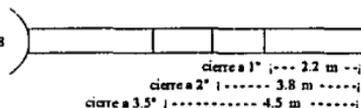
En las tablas 8.3 y 8.4 se presentan los datos registrados en el cierre de las lumbreras (8 y 10) medidos a partir de las penetraciones.

FECHA	P-34	P-33	P-32	P-31	P-30
	1" - 2" - 3.5"	1" - 2" - 3.5"	1" - 2" - 3.5"	1" - 2" - 3.5"	1" - 2" - 3.5"
14 JUN	inicio sub	-	-	-	-
15	-	inicio sub	-	-	-
16	-	fin sub	inicio sub	-	-
17	-	0.0	fin sub	-	-
18	fin sub	0.0	0.0	inicio sub	-
19	-	-	-	fin sub	inicio sub
21	0.3	0.0	0.0	2.0	2.5 fin sub
22	0.6	0.8	0.5	2.6	2.5
23	2.1	0.8	0.8	2.6	2.5
24	2.1	1.0	0.9	2.6	2.9
25	2.2	1.3	1.2	2.8	3.2
26	2.0	0.9	1.1	2.8	3.0
29	2.0	1.0	1.0	2.8	3.0
30	1.2-1.0-3.2	1.3-0.8-5.0	1.3-1.3-4.8	2.8-4.0-4.6	3.0-3.8-4.9
1 JUL	1.1-1.0-4.1	1.2-1.1-4.9	1.0-1.1-4.8	2.8-3.9-4.6	3.0-3.8-4.8
2	1.2-1.2-4.9	1.2-1.1-4.9	1.0-4.5-4.8	2.8-4.5-4.6	3.0-4.4-4.9
5	1.2-0.9-4.8	4.8-4.9-4.6	1.4-4.3-4.9	4.5-4.5-4.9	3.9-4.8-4.6
7	2.2-3.8-4.5	4.6-4.1-4.8	1.4-4.6-4.9	4.5-4.6-4.8	3.9-4.7-4.9
9	4.7-4.7-4.8	4.1-4.1-4.8	1.4-4.5-4.9	4.5-4.6-4.6	4.6-4.7-4.5

tabla 8.3. Cierre de la Subexcavación en la lumbrera 8, en m

1. Los días faltantes son de descanso o no se midió.
2. 1° - 2° - 3.5°: Diámetros de la punta del escantillón.
3. P-34: Penetración No. 34
4. Sub: Subexcavación.
5. Ejem: 2.2 - 3.8 - 4.5 Longitud de cierre en m con los 3 escantillones (1°, 2° y 3.5°), medidos en la penetración 34 el día 7 de julio de 1993. Estos valores pueden ser erráticos cuando hay grumos en el suelo.

LUMBRERA 8



FECHA	P-12	P-11	P-10	P-9	P-8
	1° - 2° - 3.5°	1° - 2° - 3.5°	1° - 2° - 3.5°	1° - 2° - 3.5°	1° - 2° - 3.5°
17 JUN	inicio sub	-	-	-	-
18	fin sub	inicio sub	-	-	-
21	0.1	fin sub	inicio y fin	inicio sub	-
22	-	-	-	fin sub	inicio sub
23	-	-	-	-	fin sub
24	0.9	1.4	1.2	0.0	0.0
25	0.95	1.7	1.4	0.0	0.13
28	0.9	1.75	1.4	0.0	0.9
29	0.9	1.7	1.4	0.9	0.9
30	0.9-0.9-3.8	1.7-2.1-2.7	1.4-1.4-1.4	0.8-0.8-1.2	0.9-0.5-1.3
1 JUL	1.0-1.0-4.4	1.9-1.9-2.6	1.4-1.4-1.4	0.8-0.7-1.2	0.9-0.9-3.6
2	1.0-1.3-4.9	1.9-2.6-2.9	1.5-1.5-1.5	0.8-0.8-1.8	1.0-1.0-4.1
5	1.0-3.9-4.8	2.2-2.6-2.9	1.5-1.5-1.5	0.8-0.9-1.4	4.1-4.1-4.0
7	4.3-4.8-4.9	2.3-2.9-3.0	1.5-1.5-1.5	0.8-1.0-1.4	4.1-4.3-4.2
9	4.2-4.8-4.9	2.2-2.5-2.9	1.4-1.5-1.5	1.0-1.0-1.3	4.0-4.0-4.0

Tabla 8.4. Cierre de la Subexcavación en la lumbrera 10, en m

FACTORES A CONSIDERAR EN EL CIERRE EN LAS LUMBRERAS

- 1) La longitud efectiva del barreno se obtiene de restar la longitud total de la penetración (6 m) menos la boquilla (0.60 m).
- 2) Cuando se intercepta pilote de control la longitud efectiva de la penetración se reduce y se resta los 0.60 m de la boquilla.
- 3) La longitud de cierre se mide del fondo de la penetración hacia la pared de la lumbrera.
- 4) El cierre (%) se obtiene de dividir la longitud de cierre entre la longitud total del barreno menos la boquilla.

$$\text{Cierre \%} = \frac{\text{Long .Cerrada}}{\text{Long .Total} - 0.6}$$

- 5) Los días posteriores de subexcavación se cuentan a partir del fin de la subexcavación en la penetración y hasta el día en que se midió el cierre.
- 6) La velocidad de cierre se obtiene de dividir la longitud de cierre entre el número de días posteriores de subexcavación.

Condiciones relativas al cierre.

Lumbrera 8, usando escantillon de 1" se registraron en los primeros dos días, caidos en las penetraciones 30 y 31 con medidas de cierre inicial de 2.5 m. Entre 16 y 21 dias la mayoría de las penetraciones 30 a 32 habían cerrado del orden de 4.5 m en promedio, (83%) exceptuando la penetración 32 que a 22 días únicamente cerro 1.4 m (26%).

Con diámetro de escantillon de 2" a 15 días después del fin de la subexcavacion las penetraciones 30 a 32 habian cerrado el 83% aproximadamente (4.5 m); las penetraciones 33 y 34 cerraron al mismo porcentaje anterior 4 y 6 días después de esta fecha.

Con diámetro de escantillon de 3.5" todas las penetraciones cerraron al 89% aproximadamente (4.80 m) a los 13 días.

Lumbrera 10. Con diámetro de escantillon de 1" (grafica que se presenta al final de este capitulo) se registro que en las penetraciones 8 y 12, el 78% del cierre (4.2 m) se presento a los 12 días respectivamente.

Las penetraciones 9, 10 y 11 interceptaron pilote.

Con escantillon de 2", (grafica que se presenta al final de este capitulo) las medidas son parecidas a las anteriores.

Finalmente con escantillon de 3.5" (grafica que se presenta al final de este capitulo) se observó que a 14 días las penetraciones 8 y 12 habian cerrado en promedio 4.5 cm (83%); las penetraciones 9 y 11 cerraron al 90% aproximadamente, a los 11 días después del fin de la subexcavacion.

Del cierre medido en las penetraciones, se define una velocidad media de cierre, con escantillon de 1", de 0.17 m/día y 0.16 m/día para las lumbreras 8 y 10 respectivamente.

Rendimiento de subexcavacion.

El rendimiento promedio de la subexcavacion fue de 4.6 m/día y 3.6 m/día.

Se considera que los valores anteriores son bajos por lo tanto es necesario aumentar la velocidad del pistón; además es necesario modificar la tubería para agilizar el acoplado y desacoplado. Con la finalidad de incrementar el número de metros subexcavados por jornal, se ha substituido la unidad de potencia hidráulica y el pistón, por equipo más rápido y potente, cuyas características principales son las siguientes:

- Unidad de potencia hidráulica con tanque de hidrogeno una mayor velocidad de penetración (1 m en 15 seg) y de extracción (1 m en 2 seg) y con la bomba con motor de 2 HP es de 1 m en 2 min tanto en la penetración como en la extracción.
- Motor de 7.5 HP.
- Pistón con amortiguamiento hidráulico con una fuerza de 10 y 8 ton en penetración y extracción respectivamente.

- Tubería de subexcavación con pernos para reducir el tiempo de maniobras y acelerar el número de penetraciones por día.
- La canastilla es una laminilla en forma de paraboloide con ciertas ranuras que se coloca en la parte de enfrente del tubo subexcavador, que entra a presión hasta cierta longitud; cuya función es no dejar salir el material a la hora de extraer el tubo perforador.

Formula para obtener el volumen del material subexcavado en función del contenido de agua.

El modelo teórico para determinar los hundimientos que se producirán por la subexcavación se fundamenta en el volumen del suelo extraído de las penetraciones; sin embargo, en campo el control se efectúa a partir del peso. La forma en que se calculará el volumen a partir de este peso, se presenta enseguida.

Obtención del material subexcavado. Cuando se efectúa la primera pasada de subexcavación en material inalterado con humedad natural, la formula para determinar el volumen de material subexcavado en función del peso del material húmedo, se cita a continuación; debiendo determinar previamente en el laboratorio, el peso volumétrico de la arcilla, donde:

$$V=Wm/PV \dots\dots\dots(1)$$

donde:

- V=volumen
- Wm= peso del material húmedo.
- PV= peso volumétrico.

En el caso cuando la penetración esta llena de agua, el volumen real de material subexcavado queda en función del contenido de agua.

El contenido de agua se determina con la siguiente formula:

$$w=Ww/Ws \% \dots\dots\dots(2)$$

donde:

w= contenido natural de agua.

Ww= peso del agua.

Ws= peso de sólidos.

Despejando de la ecuación anterior el peso del agua (Ww) se tiene:

$$Ww = w Ws \dots\dots\dots(3)$$

El peso del material húmedo es:

$$Wm = Ws + Ww \dots\dots\dots(4)$$

Substituyendo el peso del agua de la ecuación (3) en la ecuación (4), se obtiene.

$$Wm = Ws + w Ws = Ws (1+w) \dots\dots\dots(5)$$

Despejando el peso de sólidos tenemos.

$$Ws = Wm / (1+w) \dots\dots\dots(6)$$

Además del contenido de agua y del peso del material subexcavado, es necesario determinar la densidad de sólidos mediante ensayos de laboratorio.

La formula es :

$$Ss = Ws / Vs \gamma_o \dots\dots\dots(7)$$

donde:

Ss= densidad de sólidos

Vs= volumen de sólidos

γ_o = peso volumétrico del agua.

De la ecuación anterior despejando el volumen de sólidos tenemos.

$$V_s = W_s / S_s \gamma_o \dots\dots\dots(8)$$

El volumen del material es:

$$V_m = V_s + V_w \dots\dots\dots(9)$$

donde:

V_m = volúmen de material húmedo subexcavado.

V_s = volumen de sólidos.

V_w = volumen de agua.

Como el peso volumétrico del agua es igual a la unidad y el volumen es igual a su peso, cuyo valor según la ecuación (3) es:

$$V_w = W_w = w W_s \dots\dots\dots(10)$$

Sustituyendo en la ecuación (9) las ecuaciones (8) y (10) tenemos:

$$V_m = W_s / S_s \gamma_o + w W_s \quad \text{factorizando } W_s \text{ tenemos.}$$

$$V_m = W_s (1 / S_s \gamma_o + w) \dots\dots\dots(11)$$

Finalmente sustituyendo en la ecuación (9) las ecuaciones (8) y (11) tenemos.

$$V_m = W_s / S_s \gamma_o + w W_s$$

factorizando W_s tenemos.

$$V_m = W_s (1 / S_s \gamma_o + w), \text{ pero } W_s = W_m / (1+w)$$

por lo tanto:

$$V_m = W_m / (1+w) (1 / S_s \gamma_o + w) \dots\dots\dots(12)$$

que es la formula para obtener el volumen del material remoldeado subexcavado, en función de tres datos conocidos:

- peso de la muestra húmeda (W_m)
- contenido de agua (w)
- densidad de sólidos (S_s)

SEGUNDA ETAPA DE SUBEXCAVACION

Para comprender la segunda etapa de subexcavación se pone en marcha un número tal de lumbreras en operación, que posteriormente serán divididas en fases de subexcavación.

Las fases de subexcavación tienen como objetivo generar diferenciales que obliguen a girar las naves procesionales, que permitan determinar la respuesta real de la estructura.

Primera fase de subexcavación. Consiste excavar la parte Norte de la Catedral dando dos pasadas en cada boquilla de las lumbreras, L-6, L-7, L-8, L-10 y L-11 para generar un hundimiento teórico de 2.0 cm; y provocar un cierre en la nave central (figura 8.11).

Segunda fase de subexcavación. Tiene como objetivo extender los movimientos correctivos a la parte Norte con el fin de inducir el giro de la fachada y abside hacia el Sur operando nueve lumbreras que son:

L-1, L-2, L-3, L-4, L-6, L-7, L-8, L-10 y L-11 provocando un asentamiento teórico de 4.0 cm (figura 8.10).

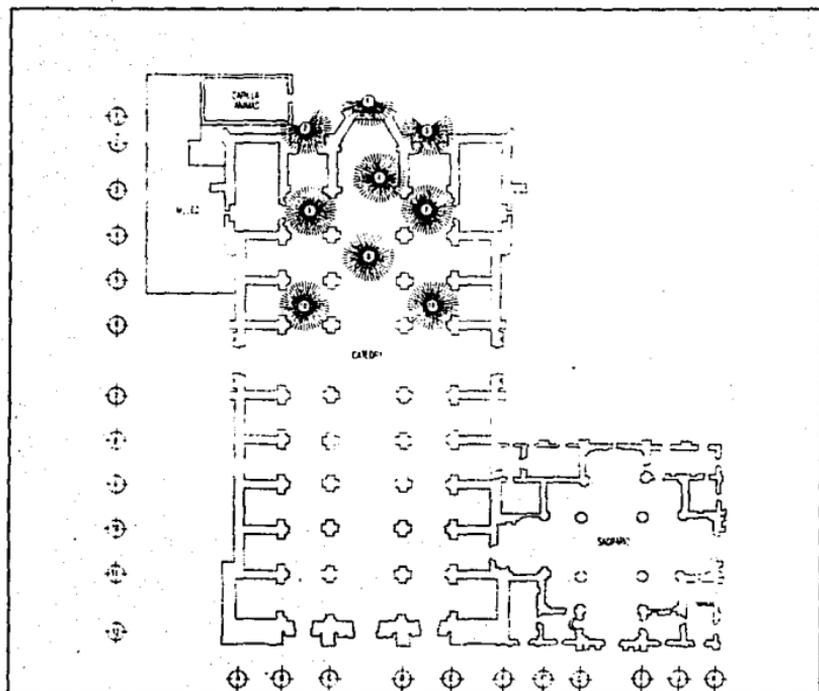


figura 8.10

Tercera fase de subexcavación. Comprende un total de 19 lumbreras puestas en marcha incluyendo las lumbreras anteriores dando dos pasadas en las 19 lumbreras, para inducir un hundimiento teórico máximo de 6.0 cm, con la finalidad de que en la zona Norte de la Catedral continúe el giro de las naves procesionales y de capillas hacia la central, y los muros de la fachada Norte y en el abside giren hacia el Sur.

Peso y volumen de material subexcavado en la primera fase.

Se presenta un resumen del peso acumulado semanal del material subexcavado en la primera fase de subexcavación en cada una de las lumbreras antes referidas en la primera fase de subexcavación (tabla 8.5).

LÚMBRERA	PASADA	S E M A N A						PESO ACUMULADO	
		1	2	3	4	5	6	1a. Pasada	2a. Pasada
6	1a.	136.4	665.45	598.95	889.81	322.4	-	2632.81	-
	2a.	-	-	-	-	832.9	722.9	-	1555.8
7	1a.	128.0	320.65	382.5	602.45	959.85	-	2394.55	-
	2a.	-	-	-	-	588.7	971.5	-	1540.2
8	1a.	958.2	882.2	915.9	-	-	-	2556.3	-
	2a.	-	-	-	620.2	1376.6	-	-	1998.8
10	1a.	719.0	727.2	1075.75	-	-	-	2572.55	-
	2a.	-	-	-	932.6	487.8	-	-	1420.2
11	1a.	-	417.4	568	938.75	379.1	-	2303.25	-
	2a.	-	-	-	-	626.85	850.15	-	1477.1
T O T A L								12409.46	7992.1

tabla 8.5 PESO DEL MATERIAL HUMEDO SUBEXCAVADO (γ_h). ACUMULADO SEMANAL EN kg.

Se observa que el peso total de material subexcavado fue de 20,401.56 Kg, correspondiendo 12,409.46 kg a la primera pasada y 7,992.1 kg a la segunda pasada; en la segunda pasada se extrajo en promedio el 64.4% en peso con relación a la primera.

El volumen total de material subexcavado fue de 16.8 m³ obtenido considerando pesos volumétricos de 1260 kg/m³ y 1150 kg/m³, para material inalterado y remoldeado.

De los datos presentados en la tabla 8.5, se obtuvieron los siguientes pesos promedio de material extraído por semana.

Lumbrera 6	1a pasada peso promedio subexcavado = 687.40 kg/semana.
Lumbrera 6	2a pasada peso promedio subexcavado = 1169.8 kg/semana.
Lumbrera 7	1a pasada peso promedio subexcavado = 589.60 kg/semana.
Lumbrera 7	2a pasada peso promedio subexcavado = 1540.20 kg/semana.
Lumbrera 8	1a pasada peso promedio subexcavado = 852.10 kg/semana.
Lumbrera 8	2a pasada peso promedio subexcavado = 999.40 kg/semana.
Lumbrera 10	1a pasada peso promedio subexcavado = 840.9 kg/semana.
Lumbrera 10	2a pasada peso promedio subexcavado = 1067.80 kg/semana
Lumbrera 11	1a pasada peso promedio subexcavado = 726.60 kg/semana.
Lumbrera 11	2a pasada peso promedio subexcavado = 1110.60 kg/semana.

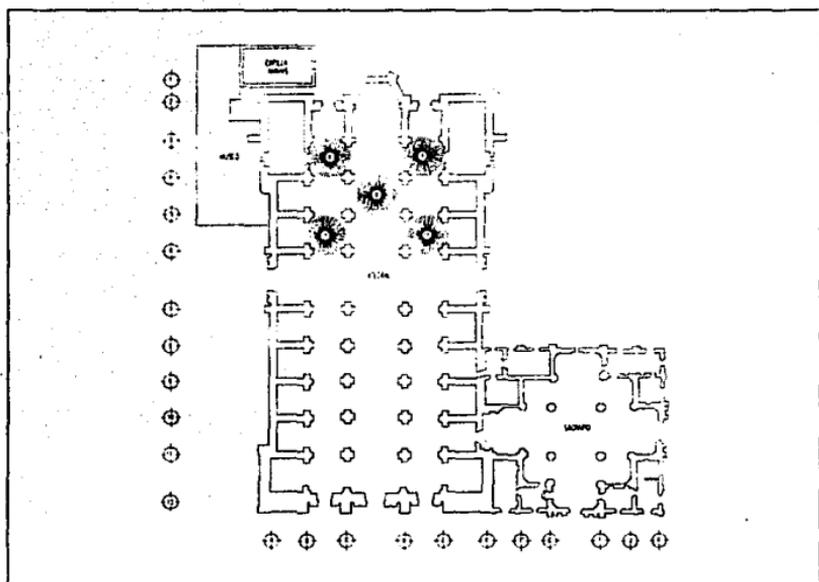


figura 8.11

Concluida la primera pasada de subexcavación en cada lumbrera se mide el cierre longitudinal en cada una de las penetraciones empleando un escantillón de 1" y 3.5" de diámetro.

En las tablas 8.6 a la 8.9 se presentan los valores registrados.

PENETRACION No.	LONG. EFECTIVA DEL BARREND (m)	LONG. CIERRE (m)	CIERRE %	DIAS POST. DE SUBEX.	VEL. CIERRE cm/día
1	5.40				
2	5.40	5.16	95.00	27	19.10
3	5.40	5.14	95.00	24	21.40
4	5.40	5.14	95.00	24	21.40
5	5.40	5.35	99.00	24	22.30
6	5.40	5.34	98.00	23	23.20
7	5.40	5.19	96.00	21	24.70
8	5.40	5.20	96.00	21	24.60
9	5.40	5.25	97.00	20	26.30
10		1.75	73.00	20	8.60
11	interceptó pilotes *2.40	2.30	95.80	19	12.10
12	interceptó pilotes *3.40	3.16	92.90	19	16.60
13	5.40	5.37	99.40	19	28.30
14	5.40	5.34	98.80	18	29.70
15	5.40	5.22	96.60	18	29.00
16	5.40	5.37	99.40	18	33.60
17	5.40	5.31	98.30	15	35.40
18	5.40	5.29	97.90	15	35.30
19	5.40	5.10	94.40	14	36.40
20	interceptó pilotes *4.40	4.40	100.00	14	31.60
21	5.40	5.40	100.00	14	39.60
22	5.40	5.40	100.00	13	41.80
23	5.40	5.40	100.00	13	41.50
24	5.40	5.40	100.00	13	41.60
25	5.40	5.14	95.20	12	42.80
26	5.40	5.40	100.00	12	45.30
27	5.40	4.04	74.80	11	36.70
28	5.40	5.40	100.00	9	60.40
29	5.40	5.29	97.90	9	58.80
30	5.40	5.33	98.70	9	59.20
31	5.40	5.33	98.70	9	59.20
32	5.40	5.31	98.30	8	66.40
33	5.40	5.30	98.10	8	66.30
34	5.40	0.76	14.00	8	9.50
35	interceptó pilotes *1.40	1.28	91.40	8	16.80
36	interceptó pilotes *2.40	2.05	85.40	8	25.60
37	5.40	4.79	88.70	8	59.90
38	5.40	4.55	84.20	7	65.00
39	5.40	5.09	94.20	5	101.80
40	5.40	5.15	95.40	5	103.00
41	5.40	5.39	99.60	5	107.80
42	5.40	5.13	95.00	5	102.60
43	5.40	5.13	95.00	5	105.80
44	5.40	5.26	97.40	4	131.50
45	interceptó pilotes *3.40	2.84	96.10	2	142.00
46	5.40	5.19	96.10	2	259.50
47	5.40	1.41	26.10	2	70.50
48	5.40	0.85	15.70	2	42.50
49	interceptó pilotes *3.40	0.00	0.00	1	0.00
50	5.40	0.65	12.00	1	65.00

Tabla 8.6 Medidas del cierre longitudinal en la lumbrera 6, fecha 22/sep/93 escantilon de 3.5" de diametro

PENETRACION No.	LONG. EFECTIVA DEL BARENO (m)	LONG. CIERRE (m)	CIERRE %	DIAS POST. DE SUBEX.	VEL. CIERRE cm/día
1	5.40	5.00	92.60	21	23.80
2	5.40	5.16	95.40	20	25.80
3	5.40	5.08	94.00	20	25.40
4	interceptó pilote *4.40	4.05	92.00	20	25.30
5	interceptó pilote *4.40	4.16	94.50	19	27.20
6	5.40	5.11	94.60	19	25.90
7	5.40	5.40	100.00	19	28.40
8	5.40	3.80	70.40	19	20.00
9	5.40	5.11	94.60	18	28.40
10	5.40	4.69	86.90	18	26.10
11	5.40	4.62	85.60	18	25.70
12	5.40	5.09	94.30	17	29.60
13	5.40	5.06	93.70	17	29.80
14	5.40	5.12	94.80	17	30.10
15	5.40	5.00	92.60	16	31.30
16	5.40	4.08	75.60	16	25.50
17	5.40	4.45	82.40	14	31.60
18	5.40	3.80	70.40	14	27.10
19	5.40	2.85	52.70	13	21.50
20	5.40	4.87	90.20	13	37.50
21	5.40	4.62	85.60	13	35.50
22	interceptó pilote *4.40	1.15	26.10	13	16.50
23	5.40	4.64	85.90	12	38.70
24	5.40	3.38	62.60	12	23.20
25	5.40	4.62	85.60	12	38.50
26	5.40	3.84	71.10	11	34.90
27	5.40	3.82	70.70	11	34.70
28	5.40	3.91	72.40	11	35.50
29	5.40	3.34	61.90	11	30.40
30	5.40	3.26	60.40	11	29.60
31	5.40	2.36	43.70	7	33.70
32	5.40	2.74	50.70	6	45.60
33	5.40	2.08	38.50	6	34.70
34	5.40	4.75	87.90	6	79.20
35	5.40	3.89	72.00	6	64.60
36	5.40	4.96	91.90	5	99.20
37	5.40	4.57	84.60	5	91.40
38	5.40	3.86	71.50	5	77.20
39	5.40	4.74	87.70	4	118.50
40	5.40	4.78	88.50	4	119.50
41	5.40	5.17	95.70	4	129.30
42	5.40	4.96	91.70	4	124.00
43	5.40	3.94	72.90	3	131.30
44	interceptó pilote *4.40	1.50	34.10	3	50.00
45	interceptó pilote *4.40	1.05	23.90	3	35.00
46	5.40	5.18	95.90	3	172.70
47	5.40	1.22	22.60	2	61.00
48	5.40	0.59	10.90	2	28.50
49					
50					

tabla 8.7 Medias del cierre longitudinal en la lumbrera 8. fecha 13/sep/93 escanillon de 1" diametro

PENETRACION No.	LONG. EFECTIVA DEL BARRENO (m)	LONG. CIERRE (m)	CIERRE %	DIAS POST. DE SUBEX.	VEL. CIERRE cm/día
1	5.40	4.52	83.70	21	21.50
2	5.40	3.26	60.40	21	15.50
3	5.40	2.70	50.00	20	13.50
4	5.40	3.52	65.20	20	17.60
5	5.40	5.13	95.00	20	25.70
6	interceptó pilote *3.40	2.40	70.60	20	22.00
7	interceptó pilote *1.40	1.25	89.30	19	27.60
8	interceptó pilote *1.40	0.08	5.70	19	21.50
9	5.40	3.88	71.9	19	20.40
10	5.40	3.63	68.10	19	19.40
11	5.40	2.25	41.70	19	11.80
12	5.40	4.90	90.70	18	27.20
13	5.40	4.82	89.20	18	26.70
14	5.40	4.94	91.50	18	27.40
15	5.40	5.32	98.50	17	31.30
16	5.40	5.30	98.10	17	31.20
17	5.40	5.15	95.40	16	32.30
18	5.40	4.83	89.40	14	34.50
19	interceptó pilote *2.40	0.34	14.20	14	23.90
20	interceptó pilote *1.40	1.10	78.60	13	39.20
21	interceptó pilote *1.40	0.50	35.70	13	34.60
22	5.40	3.75	69.40	13	28.80
23	5.40	5.08	94.10	12	42.30
24	5.40	5.15	95.40	12	42.90
25	5.40	5.16	95.60	11	46.80
26	5.40	4.37	80.90	11	39.70
27	5.40	4.78	88.50	10	47.80
28	5.40	5.10	94.40	10	51.00
29	5.40	4.24	78.50	10	42.40
30	5.40	4.60	85.10	9	51.10
31	5.40	5.01	92.70	7	71.60
32	interceptó pilote *2.40	4.94	91.50	7	70.60
33	interceptó pilote *2.40	4.83	89.40	7	69.00
34	5.40	4.64	85.90	7	66.30
35	5.40	4.93	91.30	6	82.20
36	5.40	5.32	98.50	6	88.70
37	5.40	5.32	98.50	6	88.70
38	5.40	5.33	98.70	6	88.80
39	5.40	5.12	94.80	5	102.40
40	5.40	3.98	73.70	5	79.60
41	5.40	3.93	72.80	5	78.60
42	5.40	4.10	75.90	4	102.50
43	5.40	4.58	84.40	4	114.00
44	5.40	5.28	97.70	4	132.00
45	5.40	3.89	73.90	3	133.00
46	interceptó pilote *2.40	4.15	76.90	3	138.30
47	interceptó pilote *2.40	3.58	66.30	3	119.30
48	5.40	5.00	92.60	3	166.70
49	5.40	5.07	93.90	2	253.50
50	5.40	4.67	86.50	2	233.50

tabla 8.8 Medidas del cierre longitudinal en la lumbrera 10. fecha 13/sep/93 escantilon de 1" diametro

PENETRACIÓN No.	LONG. EFECTIVA DEL BARRENO (m)	LONG. CIERRE (m)	CIERRE %	DIAS POST. DE SUBEX.	VEL. CIERRE cm/día
1	5.40	4.73	87.60	21	22.50
2	5.40	4.80	88.90	21	22.90
3	5.40	3.90	72.20	20	19.50
4	5.40	4.29	79.40	20	21.50
5	5.40	5.32	98.50	20	26.50
6	interceptó pilote *3.40	2.94	86.50	20	24.70
7	interceptó pilote *1.40	1.40	100.00	19	28.40
8	interceptó pilote *1.40	0.41	29.30	19	23.20
9	5.40	3.68	71.90	19	20.40
10	5.40	4.63	85.70	19	24.40
11	5.40	4.24	78.50	19	22.30
12	5.40	5.40	100.00	18	30.60
13	5.40	5.17	96.70	18	28.70
14	5.40	5.41	100.00	18	30.00
15	5.40	5.40	100.00	17	32.00
16	5.40	5.40	100.00	17	32.00
17	5.40	5.40	100.00	16	34.30
18	5.40	5.34	98.80	14	38.10
19	interceptó pilote *2.40	1.81	75.40	14	34.40
20	interceptó pilote *1.40	1.26	90.00	13	40.50
21	interceptó pilote *1.40	1.17	83.60	13	39.60
22	5.40	4.78	88.50	13	36.60
23	5.40	5.19	94.40	12	42.50
24	5.40	5.26	97.40	12	43.80
25	5.40	5.24	97.00	11	47.60
26	5.40	5.00	92.60	11	45.50
27	5.40	4.78	88.50	10	47.60
28	5.40	5.04	93.30	10	50.40
29	5.40	4.65	86.10	10	46.50
30	5.40	5.00	92.60	9	55.60
31	5.40	5.09	94.20	7	72.70
32	interceptó pilote *2.40	2.16	90.00	7	73.70
33	interceptó pilote *2.40	2.30	95.80	7	75.70
34	5.40	5.18	96.90	7	74.00
35	5.40	5.26	97.40	6	87.70
36	5.40	5.40	100.00	6	90.50
37	5.40	5.37	99.40	6	89.50
38	5.40	5.40	100.00	6	90.00
39	5.40	5.40	100.00	5	109.40
40	5.40	5.06	93.70	5	101.20
41	5.40	5.40	100.00	5	108.40
42	5.40	4.79	88.70	4	119.80
43	5.40	4.50	83.30	4	112.50
44	5.40	4.50	83.30	4	112.50
45	5.40	3.99	73.90	4	133.00
46	interceptó pilote *2.40	1.97	82.10	4	182.30
47	interceptó pilote *2.40	1.38	57.50	4	146.00
48	5.40	5.13	95.00	4	171.00
49	5.40	5.12	94.80	2	256.00
50	5.40	4.75	87.00	2	237.50

tabla 8.9 Medidas del cierre longitudinal en la lumbrera 10. fecha 13/sep/93 escantillon de 3.5" de diametro

Nota. En las lumbreras 7 y 11 para agilizar los trabajos se decidió suspender la medición del cierre ya que la subexcavación estaba atrasada con relación al programa de obra.

Se concluye que la primera pasada de subexcavación de las lumbreras L-6, L-7, L-8, L-10 y L-11, el peso del material extraído fue de 20,401.56 kg, con un volumen total de 16.8 m³.

En la segunda pasada, se obtuvo mayor peso promedio extraído semanal, comparando con la primera pasada, debido a que en la segunda pasada la subexcavación se realizó a menor tiempo.

En las tablas 8.6 a 8.9 se aprecia que en general la presencia de pilotes reduce la velocidad y el porcentaje del cierre de la subexcavación.

También debe notarse que la velocidad de cierre se incremento en las últimas penetraciones, exceptuando algunas ocasiones las que se subexcavaron uno o dos días al concluir la pasada.

El cierre porcentual presenta los valores más altos a medida que se incrementa el número de días posteriores a la subexcavación de la boquilla.

Peso y volumen acumulado (2da fase de subexcavación)

En la tabla 8.10 se presenta un resumen de los pesos y volúmenes de material subexcavado en cada lumbrera.

LUMBRERA	PASADA	PERIODO DE SUBEXCAVACION	PESO (kg)	VOLUMEN (m ³)
1	1	29 sep.- 11 oct. 1993	1,374.20	1.090
	2	12 oct.- 18 oct. 1993	265.65	0.492
2	1	06 oct.- 16 oct. 1993	2,325.85	1.846
	2	16 oct.- 25 oct. 1993	1,079.57	0.939
3	1	24 sep.- 13 oct. 1993	2,324.65	1.845
	2	14 oct.- 25 oct. 1993	1,239.45	1.077
4	1	23 sep.- 18 oct. 1993	2,799.65	2.222
	2	19 oct.- 26 oct. 1993	2,333.40	2.029
6	1*	26 ago.- 21 sep. 1993	2,632.81	2.069
	2*	21 sep.- 30 sep. 1993	1,565.80	1.353
	3	01 oct.- 13 oct. 1993	796.22	0.692
	4	14 oct.- 25 oct. 1993	1,036.20	0.901
7	1*	27 ago.- 23 sep. 1993	2,394.55	1.900
	2*	23 sep.- 30 sep. 1993	1,540.20	1.339
	3	01 oct.- 08 oct. 1993	1,105.70	0.961
	4	09 oct.- 19 oct. 1993	1,115.45	1.005
8	1*	23 ago.- 25 sep. 1993	1,998.80	1.738
	2*	13 sep.- 25 sep. 1993	1,998.80	1.738
	3	27 sep.- 06 oct. 1993	1,552.60	1.350
	4	07 oct.- 19 oct. 1993	1,264.20	1.099
10	1*	20 ago.- 11 sep. 1993	1,420.20	1.235
	2*	13 sep.- 21 sep. 1993	1,420.20	1.235
	3	22 sep.- 08 oct. 1993	888.30	0.772
	4	07 oct.- 21 oct. 1993	879.20	0.765
11	1*	31 ago.- 21 sep. 1993	2,303.25	1.828
	2*	22 sep.- 30 sep. 1993	1,477.10	1.284
	3	01 oct.- 13 oct. 1993	659.60	0.574
	4	13 oct.- 22 oct. 1993	825.25	0.718
A C U M U L A D O			44,606.90	37.179

tabla 8.10 *Peso y volumen del material acumulado al concluir la 2ª fase de subexcavación.*

Peso de material subexcavado= 44,606.90 kg.

Volumen 37.20 m³.

En la tabla 8.11 se presenta un resumen de los pesos y volúmenes de material obtenidos en las pasadas realizadas, así mismo se indican los rendimientos de las diferentes pasadas de subexcavación obtenidos en las lumbreras L-1, L-2, L-3, L-4, L-6, L-7, L-8, L-10 y L-11 incluyendo los datos de la 1a y 2a fases.

LUMBRERA	PASADA	PERIODO	MATERIAL EXTRAIDO			EQUIPO
			kg	kg/sem	volumen (m ³)	
1	1	29 sep - 12 oct	1374.2	687.1	1.03	EL
	2	12 oct - 18 oct	565.7	565.7	0.46	EL
	3	19 oct - 21 oct	265.6	531.1	0.20	EL
	4	22 oct - 08 nov	635.0	317.5	0.49	EL
	5	06 nov-11 nov	34.4	414.9	0.26	EL
	6	12 nov-18 nov	310.0	310.0	0.24	EL
	7	19 nov-26 nov	283.3	244.2	0.22	EL
	8*	26 nov-03 dic	357.5	307.9	0.27	EL
	9	03 dic-10 dic	392.9	338.7	0.30	EL
	10	10 dic-17 dic	457.7	394.7	0.35	EL
	11	17 dic-23 dic	433.7	433.7	0.33	EL
	12	27 dic-29 dic	266.7	533.4	0.21	EL
	13	trabajando	39.40		0.03	EL
2	1	06 oct-18 oct	2325.9	1392.7	1.80	ER
	2	16 oct-25 oct	1079.6	811.7	0.72	ER
	3	28 oct-04 oct	1206.5	1031.1	0.88	ER
	4	05 nov-11 nov	1395.6	1395.6	1.07	ER
	5	12 nov-18 nov	1137.2	1137.2	0.87	ER
	6	19 nov-25 nov	1039.7	1039.7	0.80	ER
	7*	26 nov-02 dic	731.2	731.2	0.56	ER
	8	03 dic-08 dic	544.8	656.4	0.42	ER
	9	08 dic-11 dic	561.9	851.4	0.43	ER
	10	13 dic-18 dic	569.1	862.3	0.44	ER
	11	17 dic-22 dic	540.5	651.2	0.42	ER
	12	22 dic-28 dic	412.8	619.2	0.32	ER
	13	28 dic-30 dic	366.8	733.6	0.28	ER
	14	trabajando	3.40			ER
3	1	24 sep-13 oct	2324.7	821.4	1.69	EL
	2	14 oct-25 oct	1239.5	742.2	0.90	EL
	3	25 oct-08 nov	607.9	364.0	0.44	EL
	4	06 nov-17 nov	699.7	419.8	0.51	EL
	5	18 nov-27 nov	500.9	333.9	0.36	EL
	6*	29 nov-07 dic	572.6	430.5	0.42	EL
	7	08 dic-14 dic	561.1	561.1	0.41	EL
	8	15 dic-22 dic	504.9	435.3	0.37	EL
	9	22 dic-30 dic	503.9	503.9	0.37	EL
	10	trabajando	36.00		0.03	EL
4	1	23 sep-18 oct	2799.7	1261.1	2.26	ER
	2	19 oct-26 oct	2333.4	1995.2	1.93	ER
	3	29 oct-06 nov	1549.4	1546.4	1.30	ER
	4	08 nov-12 nov	848.4	1072.3	0.71	ER
	5	13 nov-19 nov	757.0	757.0	0.64	ER
	6	22 nov-29 nov	862.6	857.6	0.72	ER
	7*	29 nov-04 dic	857.6	857.6	0.72	ER
	8	06 dic-09 dic	510.4	773.3	0.43	ER
	9	09 dic-15 dic	492.7	492.7	0.41	ER
	10	18 dic-21 dic	514.5	619.9	0.43	ER
	11	22 dic-28 dic	511.3	766.9	0.43	ER
	12	trabajando	287.1		0.24	ER
6	1	26 sep-21 sep	2632.8	687.4	2.11	EL
	2	21 sep-30 sep	1555.8	1169.8	1.28	EL
	3	01 oct-13 oct	786.2	435.1	0.64	EL
	4	14 oct-25 oct	1036.2	620.5	0.88	EL
	5	25 oct-09 nov	1142.8	571.4	0.99	EL
	6	10 nov-19 nov	1201.3	801.1	1.04	EL
	7*	22 nov-29 nov	876.8	755.9	0.76	EL
	8	30 nov-09 dic	7741.2	514.1	0.67	ER

	9	08 dic-18 dic	774.3	667.5	0.67	ER
	10	18 dic-27 dic	1142.4	856.8	0.99	ER
	11	trabajando	793.7		0.69	ER
7	1	27 ago-23 sep	2394.6	598.6	1.98	EL
	2	23 sep-30 sep	1540.2	540.2	1.30	ER
	3	01 oct-03 oct	1105.7	945.0	0.91	ER
	4	09 oct-19 oct	1155.5	770.3	0.98	ER
	5	19 oct-29 oct	1092.5	654.2	0.93	ER
	6	30 oct-24 nov	1913.0	604.1	1.63	ER
	7*	24 nov-02 dic	1549.9	1165.3	1.32	ER
	8	03 dic-04 dic	881.4	1061.9	0.75	ER
	9	09 dic-13 dic	657.5	996.2	0.55	ER
	10	14 dic-17 dic	801.7	1214.7	0.68	EP
	11	18 dic-23 dic	692.6	834.5	0.59	ER
	12	trabajando	599.9		0.51	ER
8	1	23 ago-11 sep	2556.3	852.1	2.00	ER
	2	13 sep-25 sep	1998.8	999.4	1.55	ER
	3	27 sep-06 oct	1552.6	1035.2	1.21	EL
	4	07 oct-19 oct	1264.2	690.3	1.06	EL
	5	20 oct-06 dic	1421.6	610.1	1.15	EL
	6	08 nov-19 nov	1308.1	713.5	1.09	EL
	7*	22 nov-01 dic	1034.1	689.4	0.80	EL
	8	02 dic-09 dic	805.0	694.0	0.67	ER
	9	09 dic-14 dic	650.8	784.1	0.54	ER
	10	14 dic-20 dic	462.6	462.6	0.38	ER
	11	20 dic-28 dic	568.7	568.7	0.47	ER
	12	trabajando	462.3		0.38	ER
10	1	23 ago-11 sep	2522.6	840.9	1.92	EL
	2	13 sep-21 sep	1420.2	1067.8	1.08	EL
	3	22 sep-06 oct	888.3	409.	0.67	EL
	4	07 oct-21 oct	879.2	405.2	0.66	EL
	5	22 oct-12 nov	2335.0	825.2	1.76	EL
	6	13 nov-24 nov	1315.2	792.3	0.99	EL
	7	25 nov-02 dic	703.4	666.4	0.53	EL
	8*	02 dic-09 dic	931.9	803.4	0.70	ER
	9	09 dic-15 dic	975.3	975.3	0.74	ER
	10	15 dic-20 dic	769.5	823.4	0.59	ER
	11	21 dic-27 dic	757.5	1136.3	0.57	ER
	12	trabajando	667.0		0.50	ER
11	1	31 ago-21 sep	2303.3	726.6	1.65	EL
	2	22 sep-30 sep	1477.1	1110.6	1.23	EL
	3	01 oct-13 oct	659.6	360.4	0.55	EL
	4	13 oct-22 oct	825.3	550.2	0.69	EL
	5	22 oct-06 nov	1147.4	528.7	0.97	EL
	6	09 nov-22 nov	1169.0	637.6	0.99	EL
	7*	23 nov-02 dic	943.4	628.9	0.80	EL
	8	03 dic-11 dic	818.7	615.6	0.69	EL
	9	13 dic-20 dic	660.8	566.4	0.56	EL
	10	21 dic-29 dic	734.9	734.9	0.62	EL
	11	trabajando	55.80		0.05	EL
ANTERIOR	etapa de prueba (14 de junio al 5 de agosto)		2,130.3		1.7	
SUBTOTAL	1ª Y 2ª fase de subexcavación (23 de agosto al 30 de diciembre)		103,975.8		81.07	
TOTAL	Durante 1993		105,705.9		84.77	

tabla 8.11

EL = equipo (lento) chico: bomba de 2 Hp y pistón normal.

ER = equipo (rápido) grande: bomba de 7.5 Hp y pistón con amortiguadores y tanque de hidrógeno.

* = a partir de esta fecha se uso canastilla para mejorar la recuperación del material subexcavado.

Se observa que los rendimientos son variables dependiendo del equipo empleado para subexcavar y de la velocidad de cierre de las penetraciones.

Rendimiento de la primera pasada. En la tabla 8.12 se presentan únicamente los rendimientos de la primera pasada correspondientes a las lumbreras subexcavadas con equipo chico y grande.

LUMBRERA	RENDIMIENTO EN kg/semana	
	EQUIPO CHICO	EQUIPO GRANDE
1	687.1	
2		1392.7
3	821.4	
4		1261.1
6	687.4	
7	598.6	1540.2*
8		852.1
10	840.9	
11	726.6	
PROMEDIO	727	1262

Equipo chico: Bomba de 2 Hp y pistón normal.

Equipo grande: Bomba de 7.5 Hp y pistón con amortiguador y tanque de hidrógeno.

* Rendimiento en la 2a. pasada a partir de la cual se uso equipo grande.

tabla 8.12

Como se observa el rendimiento promedio en las primeras pasadas, es del orden de 75 % mayor que se obtiene con equipo chico.

El rendimiento con:

Equipo chico= 727 kg / Semana.

Equipo grande= 1262 kg / Semana.

Estos dos valores se toman para evaluar la efectividad de las diferentes pasadas usando los dos equipos.

Porcentaje de Rendimiento. En la tabla 8.13 se presenta el porcentaje de rendimiento para dos o mas pasadas, calculadas con relación en los valores promedio antes referidos, (727 kg/semana y 1262 kg/semana).

En la última de esta columna se indica el porcentaje de rendimiento.

LUMBRERA	PASADA	PORCENTAJE DE RENDIMIENTO		
		EQUIPO CHICO	EQUIPO GRANDE	PROMEDIO
1	2	77.8	-	
	3	73.1	-	
	4	43.7	-	58.9
	5	57.1	-	
	6	42.6	-	
2	2	-	84.3	
	3	-	81.7	86.7
	4	-	110.6	
	5	-	90.1	
	6	-	-	
3	2	102.1	-	
	3	50.0	-	88.9
	4	57.7	-	
4	2	-	158.1	
	3	-	122.8	105.5
	4	-	81.0	
	5	-	60.0	
6	2	160.9	-	
	3	59.8	-	
	4	85.4	-	98.0
	5	78.6	-	
	6	110.2	-	
7	2	-	122.0	
	3	-	74.9	
	4	-	61.0	71.5
	5	-	51.8	
	6	-	47.9	
8	2	72.9	-	
	3	142.4	-	
	4	94.9	-	99.7
	5	83.3	-	
	6	98.1	-	
10	2	148.9	-	
	3	56.3	-	
	4	55.7	-	93.1
	5	113.5	-	
11	2	146.9	-	
	3	49.6	-	
	4	75.7	-	87.7
	5	72.7	-	
	6	87.7	-	

tabla 8.13 Porcentaje de rendimiento en relación promedio de la primera pasada (725 kg/semana y 1262 kg/semana)

* Porcentaje determinado con equipo grande con el que se efectuó la 1a. pasada.

De esta tabla se aprecia que el valor más bajo del porcentaje promedio se obtuvo en la lumbrera 1, 58.9 %, debido a que en esta la subexcavación se realiza con mayor rapidez por tener menor número de penetraciones (23) reduciendo el área de influencia de subexcavación, y el número de días efectivos en que se produce el cierre.

En las lumbreras restantes los porcentajes promedio varían entre 70% y 105.5 %.

Se concluye que hasta el día 22 de Noviembre de 1993 el peso acumulado de la subexcavación en las lumbreras L-1, L-2, L-3, L-4, L-6, L-7, L-8, L-10 y L-11 fue de 67,095 kg y su volumen correspondiente a 53.5 m³.

Los rendimientos promedio de subexcavación para las primeras pasadas fueron de 727 kg/semana y 1262 kg/semana, utilizando equipo chico y grande.

Los porcentajes promedio de rendimientos para dos o más pasadas, varían entre 58.9 % y 105.5 %.

Estos valores son satisfactorios ya que son mayores a los obtenidos en inicio de la subexcavación (etapa de prueba), cuyos valores variaron entre 37 % y 45 %.

Los trabajos de subexcavación se deberán de realizar combinando el uso de los equipos grande y chico con el fin de cumplir con los requerimientos de los programas de obra.

Finalmente presentamos un avance del material extraído de la subexcavación operando 19 lumbreras hasta la fecha del 29 de enero de 1994.

LUMBRERA	PASADA	PERIODO	MATERIAL EXTRAIDO			EQUIPO
			kg.	kg/sem	volumen (m³)	
1	1*	29 sep - 12 oct	1374.2	687.1	1.03	EL
	2*	12 oct - 18 oct	565.7	565.7	0.48	EL
	3	19 oct - 21 oct	265.8	531.1	0.20	EL
	5	06 nov - 11 nov	344.4	414.8	0.26	EL
	6	19 nov - 18 nov	310.0	310.0	0.24	EL
	7	19 nov - 28 nov	283.3	244.2	0.22	EL
	8	29 nov - 03 dic	357.5	307.9	0.27	EL
	9	03 dic - 10 dic	392.9	338.7	0.30	EL
	10	10 dic - 17 dic	457.7	394.6	0.35	EL
	11	17 dic - 23 dic	433.7	433.7	0.33	EL
	12	27 dic - 29 dic	260.7	533.4	0.21	EL
	13	30 dic - 06 ene	198.9	236.3	0.15	EL
	14	06 ene - 11 ene	188.9	239.9	0.15	EL
	15	11 ene - 17 ene	227.6	227.6	0.17	EL
	16	17 ene - 19 ene	213.9	427.8	0.16	EL
	17	20 ene - 24 ene	210.8	315.0	0.16	EL
	18	24 ene - 26 ene	163.0	326.0	0.13	EL
	19	26 ene - 29 ene	149.5	224.3	0.11	EL
	2	1*	05 oct - 16 oct	2,325.9	1,362.7	1.60
2*		18 oct - 25 oct	1,079.8	811.7	0.75	ER
3		26 oct - 04 nov	1,206.5	1,031.1	0.88	ER
4		05 nov - 11 nov	1,305.8	1,366.5	1.07	ER
5		12 nov - 18 nov	1,137.2	1,137.2	0.87	ER
6		19 nov - 25 nov	1,039.7	1,039.7	0.80	ER
7		26 nov - 02 dic	731.2	731.2	0.56	ER
8		03 dic - 08 dic	544.8	669.4	0.42	ER
9		08 dic - 11 dic	561.9	851.4	0.43	ER
10		13 dic - 16 dic	569.1	862.3	0.44	ER
11		17 dic - 22 dic	540.5	851.2	0.42	ER
12		22 dic - 25 dic	-412.8	819.2	0.32	ER
13		26 dic - 30 dic	368.8	733.6	0.28	ER
14		30 dic - 05 ene	375.9	563.9	0.29	ER
15		05 ene - 07 ene	338.3	678.9	0.28	ER
16		08 ene - 12 ene	353.7	530.6	0.27	ER
17		12 ene - 15 ene	419.7	620.6	0.323	ER
18		17 ene - 20 ene	381.5	572.3	0.29	ER
19		20 ene - 24 ene	303.5	545.3	0.28	ER
20		24 ene - 26 ene	342.4	684.8	0.28	ER
21		trabajando		239.0	0.18	ER

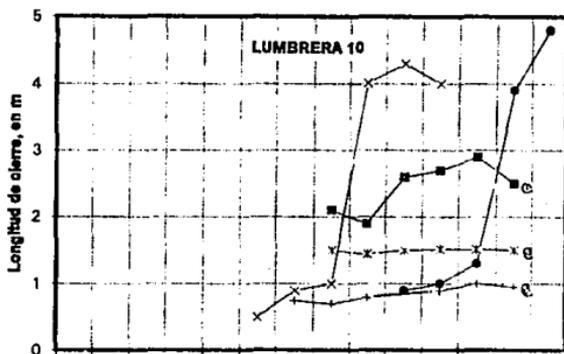
3	1*	24 sep - 13 oct	2,324.7	821.4	1.69	EL
	2*	14 oct - 25 oct	1,230.5	742.2	0.60	EL
	3	25 oct - 06 nov	607.9	364.0	0.44	EL
	4	06 nov - 17 nov	669.7	419.8	0.51	EL
	5	18 nov - 27 nov	500.9	333.9	0.36	EL
	6	29 nov - 07 dic	572.6	430.5	0.42	EL
	7	08 dic - 14 dic	581.1	451.1	0.41	EL
	8	15 dic - 22 dic	504.9	435.3	0.37	EL
	9	22 dic - 30 dic	508.9	508.9	0.37	EL
	10	30 dic - 07 ene	461.0	461.0	0.33	EL
	11	07 ene-12 ene	415.6	493.7	0.30	EL
	12	13 ene-18 ene	404.4	485.3	0.29	EL
	13	18 ene-21 ene	391.3	587.0	0.28	EL
	14	22 ene-27 ene	356.6	475.9	0.29	EL
	15	trabajando	177.6		0.13	EL
4	1*	23 sep - 16 oct	2,799.7	1,261.1	2.26	ER
	2*	19 oct - 26 oct	2,333.4	1935.2	1.63	ER
	3	29 oct - 06 nov	1,549.4	1,548.4	1.30	ER
	4	06 nov - 12 nov	848.4	1,022.3	0.71	ER
	5	13 nov - 19 nov	757.0	757.0	0.64	ER
	6	22 nov - 29 nov	862.8	743.8	0.72	ER
	7	29 nov - 04 dic	857.6	857.6	0.72	ER
	8	06 dic - 09 dic	510.4	77.3	0.43	ER
	9	09 dic - 15 dic	492.7	492.7	0.41	ER
	10	16 dic - 21 dic	514.5	619.9	0.43	ER
	11	22 dic - 28 dic	511.3	766.9	0.43	ER
	12	29 dic - 04 dic	514.4	771.4	0.43	ER
	13	04 ene-07 ene	618.0	927.0	0.52	ER
	14	07 ene-12 ene	600.2	720.2	0.50	ER
	15	12 ene-15 ene	597.3	895.9	0.50	ER
	16	17 ene-19 ene	561.3	1,122.8	0.47	ER
	17	20 ene-24 ene	518.6	777.9	0.44	ER
	18	trabajando	463.6		0.39	ER
6	1*	26 ago - 21 sep	2,632.8	687.4	2.11	EL
	2*	21 sep - 30 sep	1,565.8	1,169.8	1.26	EL
	3*	01 oct - 13 oct	796.2	435.1	0.64	EL
	4*	14 oct - 25 oct	1,036.2	620.5	0.88	EL
	5	25 oct - 09 nov	1,142.8	571.4	0.69	EL
	6	10 nov - 19 nov	1,210.6	801.1	1.04	EL
	7	22 nov - 29 nov	878.8	755.9	0.76	EL
	8	30 nov - 09 dic	771.2	514.1	0.67	EL
	9	09 dic - 18 dic	774.3	667.5	0.67	EL
	10	18 dic - 27 dic	1,142.4	856.8	0.69	EL
	11	27 dic - 04 ene	1,193.1	1,193.1	1.03	EL
12	05 ene-13 ene	1,191.6	893.7	1.03	EL	
13	13 ene-21 ene	694.7	746.0	0.86	EL	
14	trabajando	808.1		0.70	EL	
7	1*	27 ago - 23 sep	2,394.6	598.6	1.98	EL
	2*	23 sep - 30 sep	1,540.2	540.2	1.30	ER
	3*	01 oct - 08 oct	1,105.7	945.0	0.91	ER
	4*	09 oct - 16 oct	1,155.5	770.3	0.98	ER
	5	19 oct - 29 oct	1,092.5	654.2	0.93	ER
	6	30 oct - 24 nov	1,013.0	804.1	1.63	ER
	7	24 nov - 02 dic	1,549.9	1,165.3	1.32	ER
	8	03 dic - 08 dic	881.4	1,061.9	0.75	ER
	9	09 dic - 13 dic	657.5	993.2	0.55	ER
	10	14 dic - 17 dic	801.7	1,214.7	0.68	ER

	11	18 dic - 23 dic	692.6	634.5	0.59	ER
	12	27 dic - 05 ene	885.4	758.9	0.75	ER
	13	05 ene-12 ene	615.7	784.9	0.78	EL
	14	13 ene-20 ene	783.2	671.3	0.67	EL
	15	20 ene-28 ene	735.7	551.8	0.63	EL
	16	trabajando	29.30		0.02	EL
8	1*	23 ago- 11 sep	2558.3	852.1	2.00	ER
	2*	13 sep-25 sep	1,098.8	969.4	1.55	ER
	3*	27 sep - 06 oct	1,552.8	1,035.2	1.21	EL
	4*	07 oct - 19 oct	1,264.2	660.8	1.06	EL
	5	20 oct - 18 nov	1,421.6	610.1	1.15	EL
	6	08 nov- 19 nov	1,306.1	713.5	1.09	EL
	7	22 nov - 01 dic	1,034.1	663.4	0.86	EL
	8	02 dic - 09 dic	805.0	694.0	0.67	EL
	9	09 dic - 14 dic	650.6	784.1	0.54	EL
	10	14 dic - 20 dic	492.6	462.6	0.38	EL
	11	20 dic - 28 dic	568.7	569.7	0.47	EL
	12	28 dic - 04 ene	776.5	631.6	0.65	EL
	13	05 ene-10 ene	722.6	667.1	0.60	EL
	14	10 ene-15 ene	758.7	758.7	0.63	EL
	15	16 ene-26 ene	631.5	666.6	0.78	EL
	16	trabajando	363.8		0.33	EL
10	1*	23 ago- 11 sep	2,522.6	840.9	1.92	EL
	2*	13 sep- 21 sep	1,420.2	1,067.6	1.09	EL
	3*	22 sep - 06 oct	888.3	409.4	0.67	EL
	4*	07 oct - 21 oct	879.2	405.2	0.66	EL
	5	22 oct - 12 nov	2,335.0	825.2	1.70	EL
	6	13 nov- 24 nov	1,315.2	792.3	0.99	EL
	7	25 nov - 02 dic	703.4	806.4	0.53	EL
	8	02 dic - 09 dic	931.6	803.4	0.70	ER
	9	09 dic - 15 dic	975.3	975.3	0.74	ER
	10	15 dic - 20 dic	769.5	623.4	0.59	ER
	11	21 dic - 27 dic	757.5	1,136.3	0.57	ER
	12	28 dic - 03 ene	826.4	1,236.6	0.62	ER
	13	03 dic - 06 ene	858.6	1,287.9	0.65	ER
	14	06 ene-11 ene	783.6	640.6	0.59	ER
	15	11 ene-17 ene	1,006.5	1,006.5	0.78	ER
	16	17 ene-20 ene	772.9	1,159.4	0.58	ER
17	21 ene-24 ene	685.0	1,370.0	0.52	ER	
18	25 ene-27 ene	678.1	1,356.2	0.51	ER	
19	trabajando	260.1		0.20	ER	
11	1*	31 ago- 21 sep	2,303.3	726.6	1.85	EL
	2*	22 sep- 21 sep	1,477.1	1,110.6	1.23	EL
	3*	01 oct - 13 oct	659.6	300.4	0.55	EL
	4*	13 oct - 22 oct	825.3	550.2	0.69	EL
	5	22 oct - 08 nov	1,147.4	528.7	0.97	EL
	6	09 nov- 22 nov	1,1169.0	637.6	0.99	EL
	7	23 nov - 02 dic	943.4	628.9	0.80	EL
	8	03 dic - 11 dic	818.7	615.6	0.69	EL
	9	13 dic - 20 dic	660.6	566.4	0.56	EL
	10	21 dic - 29 dic	734.9	734.9	0.62	EL
	11	30 dic - 07 ene	716.8	716.8	0.61	EL
	12	07 ene-13 ene	653.9	653.9	0.55	EL
	13	13 ene-19 ene	615.2	615.2	0.52	EL
	14	20 ene-25 ene	577.2	692.6	0.49	EL

	15	trabajando	529.1		0.45	EL
13	1	04 ene-18 ene	2,247.4	963.2	1.80	EL
	2	trabajando	1,545.8		1.24	EL
14	1	03 ene-18 ene	2,198.7	929.4	1.73	EL
	2	19 ene-27 ene	1,427.5	1,070.6	1.14	EL
15	1	04 ene-18 ene	1,857.8	857.4	1.49	EL
	2	trabajando	1,210.0		0.97	EL
16	1	trabajando	789.0		0.62	
17	1	04 ene-15 ene	2,142.1	1,168.4	1.71	ER
	2	17 ene-27 ene	1,559.5	935.7	1.25	ER
	3	trabajando	265.5		0.23	ER
19	1	04 ene-19 ene	1,882.3	808.7	1.51	EL
	2	trabajando	1,118.6		0.89	EL
20	1	12 ene-28 ene	2,235.7	834.3	1.70	EL
22	1	trabajando	1,165.4		0.93	
24	1	11 ene-29 ene	3,409.2	1,202.9	2.73	ER
25	1	11 ene-29 ene	2,609.0	920.8	2.09	EL
SUBTOTAL	Subexcavación		168,742.2		127.32	
ANTERIOR	etapa de prueba (14 de junio al 05 de agosto)		2,130.3		1.7	
TOTAL			160,872.6		129.02	

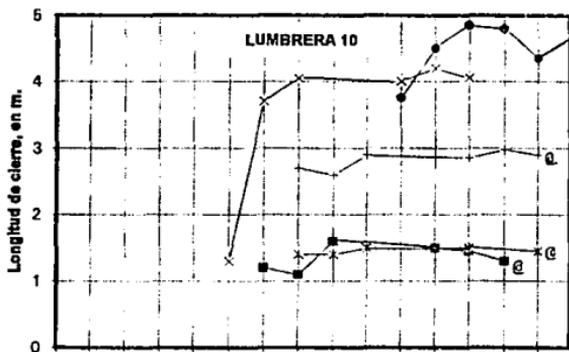
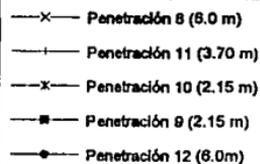
tabla B.14

Peso y volumen del material extraído de subexcavación



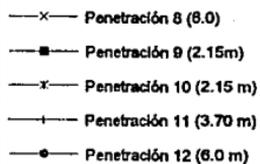
LONGITUD CIERRE VS TIEMPO FIN SUBEXCAVACION

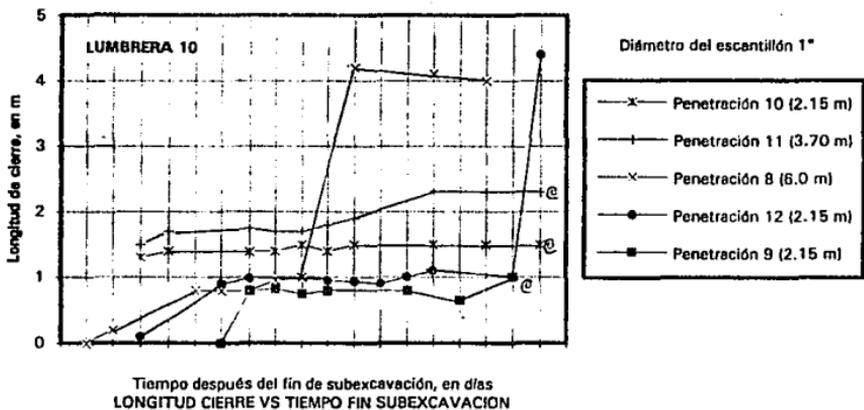
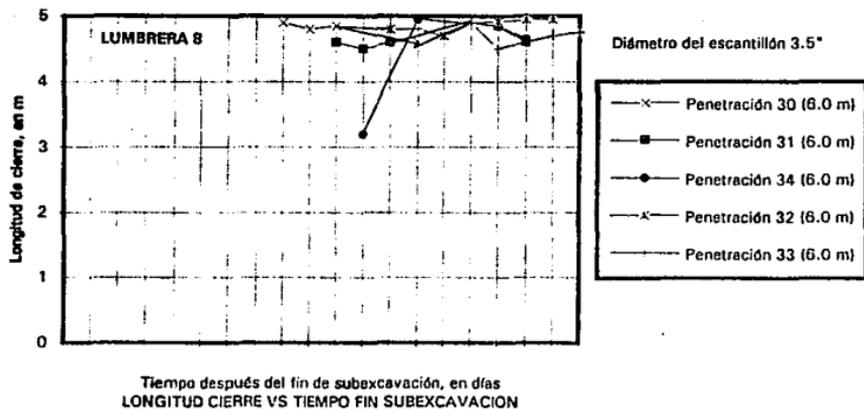
Diámetro del escantillón 2"

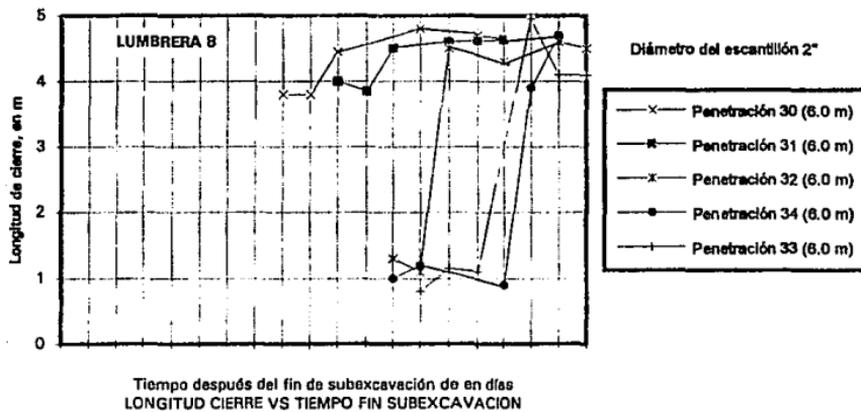
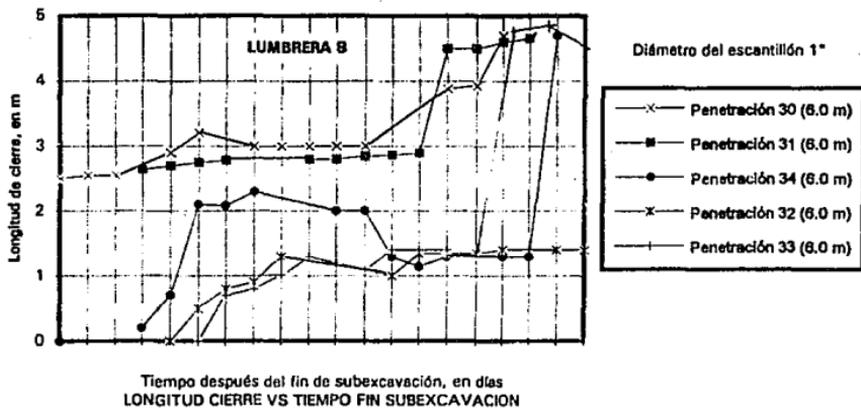


LONGITUD CIERRE VS TIEMPO FIN SUBEXCAVACION

Diámetro del escantillón 3.5"







CONCLUSIONES

La solución preferible debe de tomar en cuenta su grado de dificultad en la ejecución, las características de la estructura, las limitaciones de cimentación e interferencias de las obras en el funcionamiento de estos templos y con apoyo en el estudio realizado, la solución que se consideró más adecuada es la subexcavación y se aceptó como la técnica para devolver a estas estructuras a una posición más estable, hasta que se desarrolle alguna técnica alternativa que ofrezca ventajas y que convenga aplicar a estos templos, en cuyo caso la subexcavación no ofrece ningún obstáculo.

La técnica de subexcavación la propuso Fernando Terracina, para detener y corregir la inclinación de la Torre de Pisa en Italia, aunque no se llegó a emplear; se adoptó con éxito en la Ciudad de México en la recuperación de la verticalidad de edificios.

Es un procedimiento novedoso, basado en claros conceptos geotécnicos, que promete convertirse en herramienta de gran aplicación en los futuros trabajos de conservación de edificios de todo tipo (cimentados sobre un suelo arcilloso o similar); su bondad hará de este método un prototipo de solución para contrarrestar desequilibrios originados en muchas clases de suelos blandos afectados por procesos de preconsolidación que den lugar a hundimientos diferenciales y será, seguramente, de práctica y empleo indicado en problemas específicos de la Ciudad de México.

La subexcavación es la mejor técnica actualmente disponible; su aplicación fue reconocida por connotados especialistas internacionales, que revisaron con detalle todos los aspectos del proceso.

Esta técnica tiene como objeto corregir los desplomes de edificios que han sufrido hundimientos diferenciales, haciendo descender las partes altas con respecto a las bajas, mediante la extracción lenta y controlada del suelo en que se apoya la cimentación; siendo aplicada a varias construcciones rígidas con problemas de desplomes en la Ciudad de México durante los sismos de 1985; sin embargo la Catedral y Sagrario son un caso particular ya que no son construcciones rígidas sino construcciones de mampostería.

Antes de la aplicación de la técnica en la Catedral y Sagrario Metropolitanos se realizó primeramente un experimento en el templo de San Antonio Abad, por ser una construcción con las mismas características, los resultados obtenidos de este experimento fueron buenos lográndose los objetivos de la subexcavación.

Para llevar a cabo esta técnica fue necesario la construcción de pozos verticales llamadas lumbreras para dar acceso a la subexcavación, estas lumbreras presentan un proceso constructivo diferente a las que comúnmente se conocen (lumbreras de acceso para drenaje profundo, cajones del metro, etc.), debido a las condiciones de espacio y características del suelo donde se localiza la Catedral; el programa de trabajo que se elaboró y la metodología de subexcavación y considerando que el procedimiento ejecutado detallado solo se podrá concentrarse a medida que se avance en los trabajos, seguramente se modificará y evolucionará de manera natural con el desarrollo del proyecto y de los avances que se vayan presentado tanto en la cimentación como en la estructura de la Catedral.

El hundimiento regional provocado y acumulado a través de su historia, los fracturamientos estructurales (columnas, pilastras, arcos, bóvedas, etc.) y los desplomes cuya magnitud resulta inadmisibles que actualmente presenta la Catedral han sido originados por:

- Consolidación desigual de las arcillas del subsuelo
- Construcciones Aztecas
- Asentamiento debido al peso propio de la Catedral
- Hundimiento regional de la Ciudad de México
- Preconsolidación por construcciones pesadas, etc.

Todo esto obliga a establecer un programa de mantenimiento a largo plazo de todos los edificios que constituyen nuestro patrimonio arquitectónico, se deben implantar dos acciones básicas:

1. Racionalizar la explotación del agua del subsuelo
2. Empezar programas de investigación aplicada para desarrollar las tecnologías que este difícil problema demanda.

GLOSARIO

CATEDRAL: Dic. de la Iglesia principal de una Diócesis, en que reside el Obispo o Arzobispo con su capitulo.

SAGRARIO: 1.- Parte inferior del templo en que se reservan o guardan los objetos sagrados, tales como reliquias.

2.- Lugar donde se deposita a Cristo sacramentado, también llamado tabernáculo.

3.- En algunas Catedrales, capilla que sirve de parroquia.

ATRIO: Espacio exterior que ciñe o antecede a una Iglesia.

FELIGRESÍA: Conjunto de feligreses de una parroquia. parroquia rural, compuesta de diferentes barrios.

PRESBITERIO: Parte de la Iglesia opuesta a la entrada principal y que comprende el área del altar mayor hasta el pie de las gradas por donde se sube a él; regularmente suele estar cerrada con una reja o la entrada.

ABSIDE: Parte de una Iglesia, generalmente de planta semicircular que sobresalen del cuerpo principal del edificio, en la fachada posterior.

BIBLIOGRAFIA

INGENIERIA

REVISTA DE LA INGENIERIA MEXICANA,
PUBLICADA POR LA FACULTAD DE INGENIERIA.
Vol. LVIII Núm. 2
JUNIO 1988
Nueva Epoca.

MECANICA DE SUELOS

TEORIA Y APLICACIONES DE LA MECANICA DE SUELOS.
Tomo II
Eufalio Juarez Badillo
Alfonso Rico Rodríguez
Ed. Limusa 1989.

ANTECEDENTES GEOLOGICOS

MANUAL DE DISEÑO GEOTECNICO.
COVITUR
Departamento del Distrito Federal.
México, D.F., 1987
Mooser, F.

"FERNANDO LOPEZ CARMONA" TESIS DOCTORAL

ESTUDIO DE LA CONDICION ACTUAL DE LA CATEDRAL METROPOLITANA.
Las condiciones de la estructura en función del problema del suelo.
Facultad de Arquitectura.

ESTUDIO DE LAS CIMENTACIONES DE LA CATEDRAL Y EL SAGRARIO METROPOLITANOS DE LA CIUDAD DE MEXICO

SEDUE (Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología).
Dirección General de Sitios y Monumentos del Patrimonio Cultural.
Impreso en Talleres Gráficos de la Nación-México

MANUAL DE DISEÑO GEOTECNICO

VOL. 1
1.- Estudios Geotécnicos
2.- Diseño del Metro en Cajón.
COVITUR

LA CATEDRAL METROPOLITANA Y EL SAGRARIO DE LA CIUDAD DE MEXICO

CORRECCIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE SUS CIMENTACIONES.
SEDESOL

EFEITOS DEL SUELO DEL VALLE DE MEXICO EN EL DISEÑO Y CONSTRUCCION DE LUMBRERAS

Tesis: Elfezo Roman Garcia
José Seveino Victor Moreno Trejo.
ENEP ARAGON
U.N.A.M. 1986.

EL SUBSUELO DE LA CIUDAD DE MEXICO

INSTITUTTO DE INGENIERIA
Marsal R. J. Masari M. (1962).

ESTUDIO DE LAS CIMENTACIONES DE LA CATEDRAL Y EL SAGRARIO METROPOLITANO DE LA CIUDAD DE MEXICO

Informe preparado por T.G.C.
Geotécnia (SEDUE) 1989.

INGENIERIA DE CIMENTACIONES

Ralph B. Peck
Walter E. Hanson
Thomas H. Thornburn
Editorial Limusa 2ª Edicion

TRATADO DE CONSTRUCCION

Heinrich Schmitt
Editorial Gustavo Gili S. A.
Barcelona 1980

CIMENTACIONES

Schulze Simmer
Editorial Blome

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE CIMENTACION

M. J. Tomlinson.

CIMENTACIONES PROFUNDAS

Robert D. Chellis
Editorial Diana
México