

45



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES
"ACATLAN"

FALLA DE ORIGEN

TRATAMIENTO Y REGENERACION DE
ZONAS MINADAS AL PONIENTE DE LA
CD. DE MEXICO

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
LICENCIADO EN INGENIERIA CIVIL
P R E S E N T A
GABRIEL ZAVALA PIÑA



ACATLAN, EDO. DE MEXICO

1995



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis 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.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES "ACATLAN"
JEFATURA DEL PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL

SR. GABRIEL ZAVALA PINA
ALUMNO DE LA CARRERA DE INGENIERIA CIVIL.
P R E S E N T E :

DE ACUERDO A SU SOLICITUD PRESENTADA CON FECHA 2 DE ENERO DE 1990. ME COMPLACE NOTIFICARLE QUE ESTA JEFATURA DEL PROGRAMA TUVO A BIEN ASIGNARLE EL SIGUIENTE TEMA DE TESIS:
"TRATAMIENTO Y REGENERACION DE ZONAS MINADAS AL PONIENTE DE LA CIUDAD DE MEXICO".

INTRODUCCION.

- I.- GEOLOGIA Y ESTRATIGRAFIA DE LA ZONA.
 - II.- RECONOCIMIENTO DE CAVIDADES.
 - III.- PROBLEMAS DE ESTABILIDAD EN TERRENOS MINADOS.
 - IV.- TRATAMIENTO Y REGENERACION DE ZONAS MINADAS.
- CONCLUSIONES.
BIBLIOGRAFIA.

ASI MISMO FUE DESIGNADO COMO ASESOR DE TESIS EL
ING. JUAN VICTOR PADILLA CORREA.

PIDO A USTED TOMAR NOTA QUE EN CUMPLIMIENTO DE LO ESPECIFICADO EN LA LEY DE PROFESIONES. DEBERA PRESTAR SERVICIO SOCIAL DURANTE UN TIEMPO MINIMO DE SEIS MESES COMO REQUISITO BASICO PARA SUSTENTAR EXAMEN PROFESIONAL. ASI COMO DE LA DISPOSICION DE LA DIRECCION GENERAL DE SERVICIOS ESCOLARES EN EL SENTIDO DE QUE SE IMPRIMA EN LUGAR VISIBLE DE LOS EJEMPLARES DE LA TESIS, EL TITULO DE TRABAJO REALIZADO. ESTA COMUNICACION DEBERA IMPRIMIRSE EN EL INTERIOR DE LA TESIS.

SIN MAS POR EL MOMENTO. RECIBA UN CORDIAL SALUDO

A T E N T A M E N T E .
"POR MI RAZA HABLARE EN ESPIRITU"
ACATLAN, EDO. DE MEX. A 27 DE MARZO DE 1990



ENEP-ACATLAN
JEFATURA DEL
PROGRAMA DE INGENIERIA

ING. CARLOS ROSALES AGUILAR
JEFE DEL PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL

AGRADECIMIENTOS

A mi papá el Sr. Pablo Zavala Mancilla y a mi mamá la Sra. Elisa Piña López, dedico este trabajo y les doy las gracias por su paciencia, esmero, sacrificio y amor que han puesto en la realización de todos y cada uno de mis sueños; enseñándome siempre que el tesoro más grande se obtiene con sencillez, honestidad, trabajo y amor a quienes nos rodean...

A mis hermanas(os) Laura, Yolanda, Pablo, Jorge y Raúl, quienes con su apoyo, respeto, cariño y comunicación han retirado de mi camino todo obstáculo, mostrándome que la colaboración es el camino de la amistad y de la unión familiar; deben recordar que los llevo en mi corazón y que siempre les estaré agradecido...

A todos mis tíos y primos de los cuales siempre he recibido atenciones, afecto, cariño y mucha motivación; porque este logro también es de ustedes y nunca olvidaré lo mucho que significan en mi vida...

A todas mis amistades y compañeros, por sus consejos, enseñanzas y apoyo incondicional; porque en todas mis dudas e inquietudes encontré respuesta de su parte, muchas gracias...

Y a todas las personas que de alguna manera han contribuido con su granito de arena, en mi formación como ser humano y como profesionista.

Gabriel Zavala Piña

INDICE GENERAL

TRATAMIENTO Y REGENERACIÓN DE ZONAS MINADAS AL PONIENTE DE LA CD. DE MÉXICO.

INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO 1. GEOLOGÍA Y ESTRATIGRAFÍA DE LA ZONA.	
1.1 Introducción.	4
1.2 Desarrollo volcánico de la Cuenca del Valle de México.	4
1.3 Marco tectónico.	6
1.4 La Formación Tarango.	7
1.4.1 Contenido litológico.	8
1.4.2 Descripción estratigráfica.	11
1.5 Estudios del subsuelo en la zona.	18
1.5.1 Perfiles estratigráficos.	19
CAPITULO 2. RECONOCIMIENTO DE CAVIDADES.	
2.1 Introducción.	35
2.2 Estudio de fotointerpretación.	37
2.3 Reconocimiento superficial del sitio.	38
2.4 Métodos de exploración en zonas minadas.	39
2.4.1 Métodos directos.	40
2.4.2 Métodos semidirectos.	42
2.4.2.1 Perforaciones sin muestreo.	43
2.4.2.2 Perforaciones con muestreo.	47
2.4.2.2.1 Penetración estándar.	48
2.4.2.2.2 Barril Denison.	56
2.4.3 Métodos indirectos.	60
2.4.3.1 Método de resistividad eléctrica.	62
2.4.3.1.1 Informe de un estudio geoelectrico en la zona de estudio. .	69

CAPITULO 3. PROBLEMAS DE ESTABILIDAD EN TERRENOS MINADOS.

3.1 Alcances.	75
3.2 Factores que afectan la estabilidad.	75
3.3 Alteraciones debidas a la explotación.	76
3.4 Colapsos.	81
3.5 Cavidades aisladas.	82
3.5.1 Distribución de esfuerzos alrededor de excavaciones subterráneas unitarias.	82
3.5.2 Esfuerzos alrededor de una galería aislada de forma circular.	84
3.6 Grupo de galerías.	89
3.6.1 Distribución de esfuerzos en excavaciones múltiples.	90
3.6.2 Evaluación de esfuerzos alrededor de un grupo de cavidades.	91
3.6.2.1 Esfuerzos medios en los pilares.	92
3.6.2.2 Influencia de la forma del pilar.	93
3.7 Migración de cavidades.	95
3.8 Efecto de los sismos.	96

CAPITULO 4. TRATAMIENTO Y REGENERACIÓN DE ZONAS MINADAS.

4.1 Introducción.	98
4.2 Relleno e inyección de cavidades.	98
4.2.1 Etapas del tratamiento.	99
4.2.2 Recomendaciones prácticas.	103
4.2.3 Aspectos económicos.	105
4.2.4 Ejemplo de aplicación.	105
4.3 Excavación y relleno compactado.	108
4.3.1 Trabajos para la regeneración.	108
4.3.2 Evaluación de costos.	111
4.3.3 Limpieza y acomodo de rellenos sueltos y heterogéneos.	111
4.3.4 Excavaciones sin relleno.	112

4.4 Refuerzo de techos y protección contra el intemperismo.	113
4.4.1 Tipos de refuerzo.	113
4.4.1.1 Muros de mampostería.	113
4.4.1.2 Refuerzo de pilares naturales.	114
4.4.1.3 Arcos o bóvedas de concreto.	114
4.4.1.4 Recubrimiento con concreto lanzado.	116
4.4.2 Comparación de costos entre varias soluciones para tratar cavidades. . .	117
4.5 Cimentaciones profundas.	117
4.6 Recomendaciones para elegir la solución de tratamiento y regeneración de zonas minadas, construidas o por construir.	120
<hr/>	
CONCLUSIONES.	122
BIBLIOGRAFÍA.	124
<hr/>	
ANEXO 1. PERFILES ESTRATIGRAFICOS.	
ANEXO 2. INFORME DE PROSPECCIÓN DE CAVIDADES.	

INTRODUCCIÓN :

La problemática actual del país es consecuencia del crecimiento desmedido de la población, la mala planeación de los asentamientos humanos, la deficiencia económica del país para atender las necesidades primordiales de la población entre otros; dadas estas circunstancias se originaron otros problemas que hoy en día han cobrado mayor importancia, como sucede con las zonas minadas existentes en el D.F. y Estado de México, su origen data de fines del siglo pasado, ya que se explotaban mantos de arena pumítica que se aprovechaba en la construcción, lugares en los que la extracción de materiales pétreos se realizó en forma por de más inadecuada, dejando como prueba palpable una red intrincada de cavidades subterráneas de cientos de kilómetros de longitud.

El estado actual de las cavidades subterráneas es en ocasiones impredecible, ya que las condiciones internas de las mismas se deducen a un alto grado de intemperismo, inestabilidad en paredes techos y pilares, colapsos y migración hacia otros estratos de suelo o hacia la superficie; provocando incluso colapsos de vialidades y casas habitación desplantadas sobre las cavidades subterráneas, cuantiosos daños materiales y la pérdida de vidas humanas. Las zonas minadas a la fecha no están completamente identificadas puesto que no existen los recursos económicos suficientes para costear los estudios geotécnicos que permitan la localización e identificación de cavernas en el subsuelo.

En el presente trabajo se abordarán las zonas minadas ubicadas en el puente de la Ciudad de México, específicamente en la delegación Alvaro Obregón, ya que los asentamientos humanos existentes y los irregulares por este sitio, se encuentran en constante peligro por las condiciones prevaecientes en las cavidades subterráneas identificadas hasta el momento. Por lo tanto, el objetivo básico del tema de tesis consiste en proporcionar los medios adecuados para la detección de cavidades subterráneas de origen artificial; definir su caracterización; establecer su estado actual; y seleccionar entre los métodos de tratamiento y regeneración el más factible atendiendo a las condiciones propias de la cavidad y del sitio donde se ubica.

Ante esta situación, a partir de 1968 no se permite en el Distrito Federal la explotación de materiales finos y/o granulares en el subsuelo, además de la labor realizada por el Departamento del Distrito Federal a través de la Subdirección de Yacimientos Pétreos y Zonas Minadas, implementando las actividades necesarias para establecer un diagnóstico de las cavidades existentes a la fecha, para definir sus condiciones geométricas y de estabilidad así como evaluar las alternativas para su tratamiento o regeneración considerando su costo.

El tema está estructurado en cuatro capítulos; en el primero se expone la geología y estratigrafía de la zona; en el capítulo dos se proporcionan los antecedentes y herramientas indispensables para identificar estratos de suelo explotables, en cuya trayectoria pudiera identificarse o estar comprendida una cavidad. Describe las actividades que pueden llevarse a cabo en las minas subterráneas existentes o por detectar, desde la fotointerpretación, el uso de métodos directos como en el caso de la inspección directa y el levantamiento topográfico de las mismas; la localización de cavidades subterráneas por métodos semidirectos practicando sondeos rotativos de exploración, penetración estándar y la recuperación de muestras para ubicar los horizontes explotables; y una breve exposición del método de resistividad eléctrica como medio para hallar cavidades subterráneas en forma indirecta utilizando la prospección geofísica.

En otro apartado se presentan los problemas de estabilidad en terrenos minados, retomando algunas consideraciones de carácter teórico y empírico para la evaluación de la estabilidad en las cavidades de origen artificial, con aplicación a cavidades aisladas y de manera ilustrativa para un grupo de galerías, ya que las características particulares de los materiales que las constituyen y su geometría así lo permiten. Se hablará de los factores que afectan la estabilidad de las cavidades, las alteraciones debidas a la explotación, colapsos, distribución y evaluación de esfuerzos en cavidades aisladas así como en galerías múltiples, además de exponer lo relacionado a la migración de cavidades y el efecto de los sismos.

Finalmente como parte medular una vez que se tiene un estudio amplio y a detalle de la(s) cavidad(es) subterránea(s) existente(s), se describen los procesos para efectuar el tratamiento y regeneración de zonas minadas, considerando en algunos casos la ejecución alternada de varias actividades, recomendaciones prácticas y las actividades o variables que pueden incrementar notablemente el costo de cada proceso. Entre los principales métodos de tratamiento y regeneración que se expondrán figuran: el relleno e inyección de cavidades, la excavación y relleno compactado, refuerzo de techos y protección contra el intemperismo, así como la alternativa de cimentaciones profundas.

CAPITULO 1

GEOLOGÍA Y ESTRATIGRAFÍA DE LA ZONA

1.1 Introducción.

Los temas que se abordarán en este primer capítulo, procuran explicar de una manera general el origen de la Formación Tarango, a partir del desarrollo volcánico de la Cuenca del Valle de México. Para describir la geología actual de la zona poniente del D.F., donde queda comprendida la delegación Alvaro Obregón, se retomaron los eventos más relevantes a partir de los cuales se originó la Cuenca, especialmente los que produjeron materiales característicos de la zona en estudio y que constituyen la Formación Tarango.

En otra parte se describe el contenido litológico de la Formación Tarango, la secuencia estratigráfica más representativa y se propone una columna tipo que solo en algunos casos no corresponde exactamente a los estratos detectados en un estudio del subsuelo en esta zona, sin embargo, es muy útil en la identificación de los materiales granulares altamente explotados en estos sitios.

Por último aparecerán diecisiete estudios del subsuelo de la delegación Alvaro Obregón, realizados entre 1972 y 1989 por distintas empresas especializadas en geotecnia, señalando en éstos: el objetivo del estudio, alcances y la descripción de los estratos detectados en la ejecución de los sondeos exploratorios. Con estos estudios se pretende contribuir a la localización de horizontes granulares donde pudiera existir una cavidad, también resultan útiles para inferir la estratigrafía del subsuelo de un predio por estudiar en esta zona.

1.2 Desarrollo volcánico de la Cuenca del Valle de México.

Según Federico Mooser, la cuenca del Valle de México debe su formación a procesos volcánicos y tectónicos que se han ido desarrollando, lenta o intempestivamente, a partir del Eoceno Superior, o sea en los últimos 50 millones de años. Esta cuenca constituye un gran vaso natural azolvado, en el que se depositaron los productos de erosión derivados de las dos grandes sierras laterales y la Sierra de Pachuca, así como las cenizas de los numerosos volcanes del Sur. La enorme cortina natural la compone la Sierra del Chichinautzin que se extiende entre la Sierra de Zempoala en el Oeste y las bases del Popocatepetl en el Este, apoyándose en el centro en el macizo del Tepozteco.

También es importante señalar, que en el Plioceno Inferior (*tiempo*) se crearon las elevadas sierras al Este y al Oeste de la cuenca de México, la de las Cruces y la de la Sierra Nevada. Estas sierras, esencialmente de lavas porfidoandesíticas, son el producto de numerosos estrato volcanes mayores de prodigiosa eruptividad (fig. 1.1). La Formación Tarango, consistente en piroclásticos depositados a los pies de estas sierras, es testigo de dicha actividad explosiva. Forma abanicos volcánicos entrelazados. En esta etapa se formaron las lomas que se elevan al Oeste de la ciudad de México y constituyen los abanicos volcánicos de la Sierra de las Cruces. Comprenden la potente acumulación de materiales piroclásticos que se depositaron a los pies de los distintos aparatos volcánicos durante la vida explosiva de éstos (10 y 5 millones de años antes del presente).

En 1948 los depósitos de las lomas se estudiaron por primera vez con cierto detalle. En este año A.R.V. Arellano y K. Bryan definieron la Formación Tarango, basándose en materiales que procedían precisamente de la Barranca de Tarango al poniente de la ciudad de México, donde existían las clásicas minas de "arena azul" en explotación, que ofrecían buenos cortes.



Fig. 1.1 Desarrollo volcánico de la Cuenca del Valle de México.

1.3 Marco tectónico.

Como se expuso anteriormente, la cuenca de México debe su formación a procesos volcánicos y tectónicos que se han ido desarrollando, lenta o intempestivamente, a partir del Eoceno Superior (en los últimos 50 millones de años).

Mooser en 1957 presenta un análisis de la intensa actividad volcánica del Valle de México, el cual comprende siete fases de vulcanismo, en las que intenta presentar el desarrollo histórico de la geología de dicho Valle. Para fines de este trabajo, sólo se retomaron algunos aspectos sobresalientes de la 4a. Fase de Vulcanismo y los relacionados a la 5a. Fase; ya que en estas fases se desarrollaron los eventos más importantes, con lo cuales quedó estructurada la geología predominante en la zona poniente de la ciudad de México.

Durante la 4a. Fase de Vulcanismo, desarrollada en el Mioceno Superior, es decir hace 12 ó 14 millones de años, la cuenca de México sufrió un tectonismo en bloques a lo largo de fracturas dirigidas al NVV. Este fue sustituido por otro que se desarrolló a lo largo de fracturas dirigidas al NE, creando un conjunto de fosas y pilares que rigieron la actividad volcánica de la siguiente fase.

La 5a. Fase de Vulcanismo dio origen a las Sierras Mayores, que fijaron a la vez los límites poniente y oriente de la cuenca de México. Estas Sierras (Sierra de las Cruces, Nevada y Río Frio), son producto de efusiones sucesivas de andesitas y dacitas a través de estratovolcanes, que crearon también extensos abanicos volcánicos formados en este mismo tiempo, o sea a fines del Mioceno hasta aproximadamente mediados del Plioceno, midiendo en escala absoluta entre 10 y 5 millones de años antes del presente. De esta manera se formaron principalmente en el Plioceno Inferior las lomas al pie de estas sierras, las cuales constituyen la Formación Tarango, representada por los depósitos piroclásticos contemporáneos a las erupciones de los distintos elementos de estas sierras.

Las lavas de estos volcanes y los grandes volúmenes de proclastos que éstos emittan tras violentas erupciones, se depositaron en grandes extensiones formando abanicos volcánicos y aluviales, que fueron afectados en su primera parte por el tectonismo anteriormente mencionado, con dirección preferencial hacia el NE. Por esta razón, la mayoría de las barrancas que surcan las lomas, mantienen esta dirección dictada por el tectonismo, al actuar la erosión.

Es interesante hacer notar que la Sierra de las Cruces, al estar dirigida como unidad mayor al SSE, tiene sus centros volcánicos individuales dispuestos a lo largo de fracturamientos dirigidos al SE. Esto es posible debido a antiguas transcurencias a la derecha las que hacen que la sierra aparente obedezca a un fracturamiento (no existente) al SSE. Lo mismo ocurre con las Sierras del Río Frio y Nevada, que mantienen en conjunto una dirección anómala al SSE, aunque aquí sí existen fracturas que corren N-S, sobre todo en el Iztaccíhuatl. La Formación Tarango, al sur de Tlalnepantla, fue afectada por la Formación de las Sierras Mayores, que fijaron los límites modernos oriente y poniente de la cuenca.

1.4 La Formación Tarango.

Estratigráficamente, la Formación Tarango es correlacionable a la Serie Nochistongo y a su vez a las series lávicas de las Sierras Mayores, con las que está interestratificada y donde se originó. Los abanicos volcánicos Tarango se hallan sobre los depósitos volcánicos del Terciario Medio (Formación Xochintepec) y del Mioceno Superior (Sierras Menores, Sierra de Guadalupe y Tepotzotlán). Hacia la cuenca de México, la Formación Tarango se encuentra cubierta por los depósitos lacustres y aluviales de la Edad Cuaternaria.

Como se mencionó anteriormente, la Formación Tarango fue definida en la barranca del mismo nombre al oeste de la ciudad de México, estudiada por primera ocasión en 1948 por V. Arellano y K. Bryan y en 1962 por F. Mooser. Aquí fue descrito el afloramiento típico, en el que se hace una división en tres formaciones, las cuales fueron modificadas en años subsiguientes para simplificarla (fig. 1.2). Por consiguiente, se eliminaron las Formaciones Tacubaya y Becerra, interpretándolas como horizontes tobáceos en la cima de la Formación Tarango, que fueron erosionados, redepositados en hondonadas y sometidos a distintos grados de meteorización, consecuencia de las condiciones climáticas del Cuaternario. Así, el color gris o café oscuro de un horizonte de suelo fósil tobáceo conteniendo capas de caliche, se interpreta en la actualidad como consecuencia de un clima tendiente a árido (Meteorización Becerra). El color amarillo de otro horizonte tobáceo alterado en general, subyacente al anterior, se interpreta como consecuencia de un clima más bien húmedo (Meteorización Tacubaya).

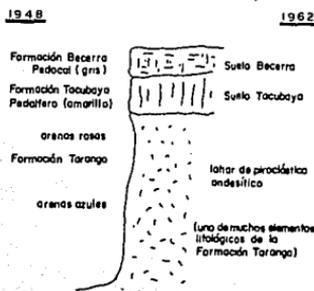


Fig. 1.2 Corte esquemático de la Formación Tarango.

La Formación Tarango representa un conjunto pseudoestratificado a veces irregular (principalmente hacia su base), ligeramente inclinado 4 grados, que alcanza espesores de 300 a 400 metros aproximadamente. Se compone de distintos elementos litológicos, que a excepción de los suelos, son producto de erupciones por lo general violentas, emitidas por las chimeneas de grandes volcanes andesíticos estratificados.

Por otra parte, Federico Mooser dividió en Inferior y Superior a la Formación Tarango, la cual se extiende desde San Angel al sur, hasta la barranca del Río Hondo hacia el norte. La base para dividir esta Formación es la discordancia de las capas entre una y otra, definida en el abanico volcánico originado por el volcán complejo del Cerro de San Miguel. La Tarango Inferior representa la acumulación de piroclásticos esencialmente cineríticos y pumílicos, aunque contiene también avalanchas ardientes y lahares con fragmentos andesíticos principalmente. Según Mooser, la característica litológica que más resalta en la Formación Tarango Inferior, es el estado caótico en el cual aparecen depositadas las series piroclásticas, fragmentos angulares grandes y chicos de andesitas y pómez. Subsecuentemente en una etapa final de actividad volcánica renovada originada en el período del Pleistoceno de la Era Cenozoica, ligada a la formación de una gran caldera, se produjeron magmas, erupciones de pómez y piroclastos de andesitas azules y dacitas. Las capas de pómez cubrieron una topografía ondulada sobre grandes distancias; los piroclastos acabaron de rellenar las barrancas profundas, sobre todo la de Santa Fe, con potentes lahares y aglomerados ígneos que hoy constituyen las minas de arena azul. Estos últimos depósitos se definieron como Tarango Superior.

1.4.1 Contenido litológico.

La Formación Tarango se compone de un conjunto estratificado en ocasiones regular, a veces irregular y hasta lenticular, ligeramente inclinado, en el cual destacan los seis siguientes elementos litológicos:

- a) Horizontes de cenizas volcánicas de muy distintas granulometrías.
- b) Capas de erupciones pumíticas.
- c) Lahares.
- d) Ignimbritas.
- e) Depósitos fluviales.
- f) Suelos.

Todos estos elementos, con excepción de los suelos, son producto de erupciones por lo general violentas, emitidas por las chimeneas de grandes volcanes andesíticos estratificados. Estas erupciones producen cenizas, pómez, brechas, avalanchas ardientes o lavas. Las brechas y cenizas son el producto de explosiones más violentas y se depositan a grandes distancias del cráter, en ocasiones estos materiales además de ser impulsados por la fuerte explosión, son arrastrados por los vientos a decenas de kilómetros. Las erupciones más violentas, por fin, producen piedra pómez depositándose ésta a través de lluvias en capas de gran uniformidad hasta distancias muy lejanas del cráter.

Los lahares son acumulaciones caóticas de material piroclástico arrastrado en corrientes lubricadas por agua. A la hora de las grandes erupciones al formarse importantes acumulaciones de material fragmentado al pie de un cono volcánico puede suceder que una lluvia torrencial impregne su masa con agua, induciendo y provocando así su movimiento lento como "corriente de lodo". Tales lahares rellenan a menudo barrancas erosionadas en los abanicos volcánicos y forman los depósitos de arenas y gravas azules tan conocidos en la zona de lomas.

Las avalanchas ardientes, o sea lahares impulsados y lubricados por gases calientes; se originan a la hora de erupciones paroxísmicas de extraordinaria violencia. Se generan y descienden con velocidad de decenas de kilómetros por hora, cuando se desintegra un tapón volcánico caliente y hasta irrumpe parte de la cámara magmática superior del volcán. A raíz de tales erupciones se han creado los depósitos uniformes, estratiformes y de separación columnar, de piedra cantera, que se conocen por el Santuario de los Remedios. Se trata de las ignimbritas ligeramente soldadas.

Después de una erupción violenta, se interpone un período de descanso más o menos prolongado. Es entonces cuando se producen fenómenos de meteorización y alteración de cenizas volcánicas superficiales; así principia la formación de suelos cuyo color se asocia al clima característico del lugar donde se hallen, por ejemplo el color rojo se asocia a climas húmedos calientes, mientras que colores como el amarillo y subdesarrollados son representativos de climas áridos y fríos.

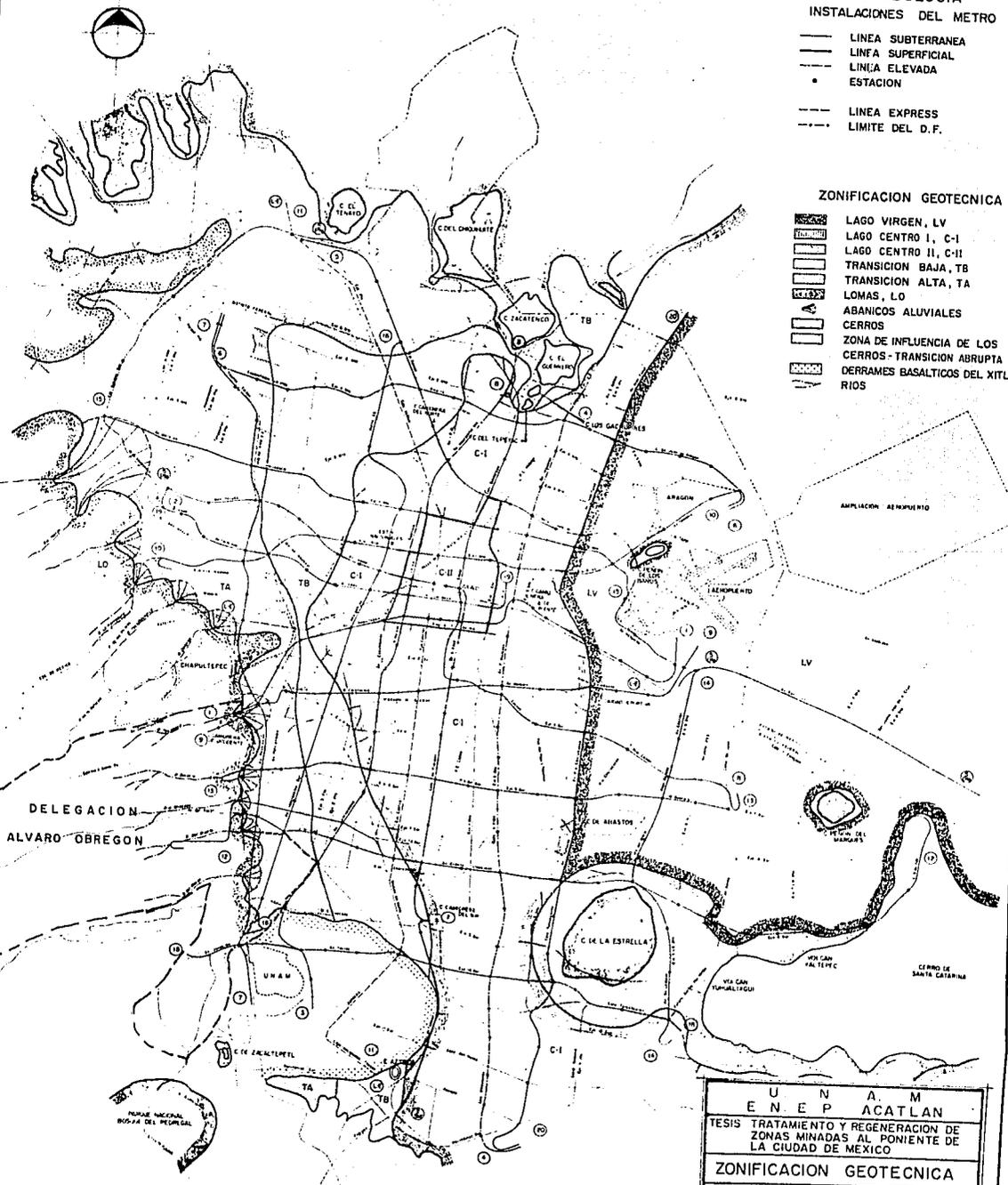
Conocidos los elementos litológicos de la Formación Tarango, se muestra la zonificación geotécnica del D.F. (fig. 1,3) y se delimita la delegación Alvaro Obregón, además se identifican los depósitos característicos de la cuenca como lo son: los lacustres, aluviales y volcánicos; esta zonificación permite definir en forma preliminar los problemas geotécnicos en el diseño y construcción de toda obra civil.

SIMBOLOGIA
INSTALACIONES DEL METRO

- LINEA SUBTERRANEA
- LINEA SUPERFICIAL
- - - LINEA ELEVADA
- ESTACION
- - - LINEA EXPRESS
- - - LIMITE DEL D. F.

ZONIFICACION GEOTECNICA

- LAGO VIRGEN, LV
- LAGO CENTRO I, C-I
- LAGO CENTRO II, C-II
- TRANSICION BAJA, TB
- TRANSICION ALTA, TA
- LOMAS, LO
- ABANICOS ALUVIALES
- CERROS
- ZONA DE INFLUENCIA DE LOS CERROS - TRANSICION ABRUPTA
- DERRAMES BASALTICOS DEL XITLE
- RIOS



U N A M	
E N E P A C A T L A N	
TESIS TRATAMIENTO Y REGENERACION DE ZONAS MINADAS AL PONIENTE DE LA CIUDAD DE MEXICO	
ZONIFICACION GEOTECNICA	
ALUMNO	DIBUJO
GABRIEL ZAVALA PIRA	D D F
FIG. 1.3	

1.4.2 Descripción estratigráfica.

Los depósitos igneos sedimentarios de la Formación Tarango, observan una pseudoestratigrafía, que a pesar de su origen, presenta una continuidad y homogeneidad notables que permiten proponer una columna tipo, la cual, solo en algunos casos, no corresponde exactamente con los afloramientos litológicos, por causas como la erosión, o por otras de ellas que de alguna manera redujeron u omitieron ciertos depósitos; sin embargo, es muy representativa y muy útil para poder identificar estratos altamente explotados, o para determinar el tipo de material aflorante en un área determinada y en base a éste, predecir la existencia de zonas minadas. La columna tipo de la que se hace mención aparece al final de este apartado como figura 1.4. A continuación se describen algunas características de los suelos presentados en la columna tipo, desde la parte superior hasta la parte inferior, siguiendo un orden descendente.

Suelos Totolsingo (S-To).

Son los primeros suelos de la columna tipo y se caracterizan por el gran contenido de materia orgánica de color oscuro; son muy recientes, su espesor es variable y tiende a incrementarse en áreas con poca erosión o con mucha vegetación; el origen de estos suelos es ajeno a los procesos que originaron la Formación Tarango.

Suelos Tacubaya y Becerra (S-Ta).

Se encuentran subyaciendo a los *Suelos Totolsingo*, poco distinguidos entre sí, son interpretados como horizontes tobáceos en la cima de la Formación Tarango, que fueron erosionados, redepositados en hondonadas y sometidos a distintos grados de meteorización a consecuencia de las condiciones climáticas del Cuaternario. El color de éstos es café claro, conteniendo capas de caliche; también en estos suelos se formaron "sensulato", como lo corrobora la presencia entre ellos, de una capa de arena pumítica de grano grueso (*Ap-G-ar*) disgregable y poco clasificada, que presenta un alto grado de intemperismo, así como un alto contenido de arcilla como matriz.

El espesor de estos suelos es particularmente variable, debido a que su exposición a los agentes atmosféricos ha sido mucho mayor que la de otros depósitos aquí referidos. Debido a esto, los afloramientos de esta unidad, se localizan en las partes altas de las lomas, disminuyendo notablemente su potencia hacia las barrancas y cortes verticales que los limitan.

Lahares (Lh).

Se localizan infrayaciendo a los *Suelos Tacubaya* y *Becerra*, en contacto concordante y algunas veces discordantemente, se trata de aglomerados ígneo-sedimentarios bien compactados, conformados por clastos de composición principalmente andesítica, aunque también se presentan clastos dacíticos, emplazados en una matriz areno-arcillosa de grano fino y cuya forma de las partículas varía desde redondeadas, subredondeadas y subangulosas. El depósito es de color gris oscuro mal clasificado, variando su granulometría desde la arena gruesa hasta boleos y bloques. Es importantes hacer notar que en estos depósitos se registran anomalías en su potencia y contenido de matriz primordialmente areno-arcillosa, así como espesores mayores de 10 metros.

Este horizonte en la actualidad ha sido explotado en minas a cielo abierto, para la obtención de gravas y arenas azules (andesíticas) y en la antigüedad su explotación fue subterránea; sin embargo, las minas subterráneas en este depósito son de menor desarrollo que las excavadas en arena pumítica, debido a la mayor compacidad y dureza de las rocas conformantes, así como su escasa clasificación que implica mayores gastos de cribado y explotación que las arenas pumíticas.

Aglomerados Dacíticos (Ag-D)

Quedan comprendidos debajo de los *Lahares*. Se definen como aglomerados ígneos con clastos de composición generalmente dacítica, emplazados en una matriz areno-arcillosa, que al igual que los *Lahares*, disminuye hasta desaparecer hacia su base; sin embargo, la potencia de este depósito es muy variable, llega a alcanzar un espesor promedio de 10 metros, el cual en algunos casos disminuye al alejarse de las partes altas de la sierra donde fue originado, de manera que en algunos afloramientos lejanos no aparece este depósito. Se considera como un aglomerado volcánico aluvial o poco transportado de su lugar de origen en el que intervino mayormente la gravedad que el transporte por agua.

Toba Arcillosa con Clastos Dacíticos (Ar-D).

Se ubica bajo los *Aglomerados Dacíticos* en contacto concordante abrupto y bien definido. Se trata de una toba arcillo-limosa compacta color café oscuro que presenta escasos clastos con poco grado de redondamiento; este horizonte es muy delgado, presentando un espesor promedio de 0.70 metros, en algunos casos puede no aparecer principalmente por razones paleogeomórficas.

Arena Pumítica de Grano Grueso (Ap-G).

Subyaciendo concordantemente a la *Toba Arcillosa con Clastos Dacíticos*, se encuentran arenas pumíticas de grano grueso que frecuentemente alcanzan el tamaño de la grava gruesa; las partículas son de forma subredondeada, presentan un color blanco y al intemperismo crema o café claro; el depósito es muy disgregable debido a la nula cementación o presencia de matriz fina; la escasa compacidad que presenta es solo debido a la compactación que ejerce la unidad litológica que lo sobreyace. En algunos afloramientos se ha detectado una matriz arcillosa, que en ocasiones provocó la suspensión de su explotación en minas subterráneas, ya que este horizonte fue frecuentemente explotado; otra característica que provocó el poco desarrollo de las cavidades excavadas en este depósito, fue su reducido espesor, cuyo promedio es de 1.50 metros y que en ocasiones se reduce a menos de 1.0 metro. Los tamaños de sus clastos varían desde la arena gruesa hasta la grava gruesa, lo cual no era una característica idónea para los mineros que la explotaron.

Toba Arcillosa con Clastos Pumíticos (Ar-P).

Se encuentra subyaciendo en contacto concordante y bien definido a la *Arena Pumítica de Grano Grueso*. Es otro horizonte tobáceo de arcilla-limosa bien compacta color café oscuro, cuyo espesor es de 1.50 metros en promedio. Este horizonte es muy constante y presenta clastos de pumitas.

Arena Pumítica de Grano Medio (Ar-M).

Se localiza subyaciendo al depósito de *Toba Arcillosa con Clastos Pumíticos*. Está constituido por arena pumítica de grano medio, muy bien clasificado y disgregable debido a la ausencia de matriz fina, presenta arcilla solo en lineaciones hacia su base que sí "ensucian" el depósito, pero no lo suficiente como para suspender su explotación, ya que debido a su poca cementación y buena clasificación, que rara vez varía de la arena de grano medio a grueso, así como un espesor muy constante, de 2.00 a 2.50 metros, permitía la explotación únicamente del horizonte de interés bajo una altura cómoda de la mina subterránea. Estos factores fueron los que provocaron que este horizonte pumítico fuera el mayormente explotado de la Formación Tarango, comprendiendo arriba del 70% de las minas subterráneas. En este depósito se hallan las cavidades de mayor desarrollo que algunas veces atraviesan el horizonte de toba arcilla-limosa que lo separa del otro horizonte de arena pumítica antes descrito y se desarrolla en dos niveles diferentes, explotando a la vez a ambos pseudoestratos pumíticos.

Generalmente la altura estratigráfica de este horizonte ha sido sobrepasada por el nivel actual de profundización de las barrancas de la zona, por lo que todos sus afloramientos se localizan en las laderas de éstas y generalmente en su parte más baja, donde se sitúan las bocaminas de las cavidades excavadas en este horizonte.

Presenta una inclinación general tendiente hacia el NE, debido a que su lugar de origen son las sierras altas ubicadas al NW del área en estudio.

Toba Areno - Limosa (TO).

Se sitúa bajo el horizonte de *Arena Pumítica de Grano Medio*. Es una toba arena-limosa muy mal clasificada color café claro, con clastos de distintas rocas ígneas como pumitas, dacitas y andesitas heterogéneamente distribuidas en una matriz areno-limosa de origen tobáceo regularmente compactada y poco cementada cuyo espesor, aunque variable, presenta de 1.50 a 2.0 metros; su contacto superior es abrupto y bien definido; sin embargo, el inferior es gradual, en el que se aprecia un aumento parcial de los clastos pumíticos en el depósito hasta cambiar al suelo subyacente (*Ap-Ar*).

Arena Pumítica con Arcilla (Ap-Ar)

Se halla subyaciendo al depósito de *Toba Areno - Limosa*. Es un estrato de espesor variable entre 1 y 2 metros, en el que se identifican arenas pumíticas regularmente clasificadas, de grano medio y grueso ligeramente compactadas por una matriz arcillo-limosa.

Este estrato pumítico también se encuentra incluido dentro de las tobas antes mencionadas, ya que afloran nuevamente bajo este horizonte con las mismas características descritas.

Toba Areno - Limosa (To)

Se encuentra subyaciendo al depósito de *Arena Pumítica con Arcilla*. Estas tobas (*To*), comienzan a presentar algunas diferencias hacia su base, presentando una mayor cantidad de clastos andesíticos y dacíticos, comparado con los pumíticos mayormente abundantes en la toba sobreyacente al estrato pumítico anteriormente referido.

Otra característica notable es que su composición general es más ácida, dándole al depósito una coloración rosácea y con mucho menos cantidad de arcilla, siendo frecuentemente identificada como arenas rosas, mencionadas por Mooser.

Este depósito se desarrolla por 15 metros más aproximadamente y en algunas ocasiones sobreyace a un último estrato (*Ap-Inf*) de arena pumítica mal clasificada y sucia o contaminada por arcilla y que presenta muy poca continuidad, ya que frecuentemente es acuñado por estas mismas tobas rosadas; presenta una estructura lenticular con espesor promedio de 1 metro y solo unos cuantos cientos de metros de largo.

Agglomerados Volcánicos (Ag-V)

Es el último depósito presente en la columna tipo. Se trata de agglomerados ígneos bien compactos y mal clasificados, compuestos por clastos subangulosos a subredondeados de rocas ígneas extrusivas, como andesitas, dacitas y rhyodacitas; el tamaño varía desde la grava hasta los boleos, emplazados en una matriz areno-limosa. Su espesor no supera los 20 metros; sin embargo, para los objetivos de este trabajo, es más que suficiente el presentarlo sin importar litologías subyacentes que no afloran y que, por supuesto, no se relacionan con el problema aquí desarrollado.

La Formación Tarango se divide en Superior e Inferior y considerando las descripciones que las diferencian como el grado de homogeneidad de la parte Superior y heterogeneidad de la Inferior, se tomo como división entre éstas dos a la toba areno-limosa mal graduada como primer estrato o estrato superior de la parte Inferior de la Formación Tarango, ya que a partir de éste, se pierde continuidad en los depósitos, así como la apreciación de una heterogeneidad y mal clasificación de los estratos subyacentes a este límite imaginario.

De esta forma la columna estratigráfica propuesta como tipo para el presente trabajo, representa la forma más común en la superposición de los depósitos piro-sedimentarios que conforman la Formación Tarango, de tal manera que ésta, se puede utilizar como un instrumento útil para la exploración, estudio y solución de problemas provocados por cavidades o minas subterráneas.

Por otra parte, al observar los distintos cortes de la Formación Tarango se aprecia la ausencia de flora fósil en el conjunto estratigráfico; esto se debe a que los depósitos se formaron en el Plioceno, tiempo caracterizado por su clima árido, en el cual difícilmente podrían crecer bosques o vegetaciones exuberantes sobre los suelos tobáceos de las lomas en formación. Otra de las causas de este fenómeno fueron las constantes erupciones, lo que impedía el crecimiento de la vegetación.

COLUMNA TIPO

	STRATIGRAFIA	DESCRIPCION
VARIABLE	S Tc	SUELOS TOTOLINGO COLOR OSCURO CON ALTO CONTENIDO DE MATERIA ORGANICA
VARIABLE	S Tc	SUELOS TACURANA COLOR CAFE CLARO CON BANDAS DE CALICHE
0 50	Ap G Ar	ARENA PUMITICA DE GRANO GRUESO MUY ARCILLOSA E INTERFERAZADA
VARIABLE	S Tc	ESTOS SUELOS SON RESIDUALES DE TORAS ARENO ARCILLOSAS
250-1000	Lh	LAMARES COMPUESTOS POR AGLOMERADOS BIEN COMPACTADOS DE CLASTOS ANEUSTICOS PRINCIPALMENTE SUBREDONDEADOS A SUBANGULOSOS EMPLAZADOS EN UNA MATRIZ MUY ESCASA, SIN EMBARGO EN LAS INMEDIACIONES DE LOS APARATOS VOLCANICOS ESTOS DEPOSITOS PRESENTAN UNA MATRIZ ARENOSA, SU COLOR ES GRIS OSLRO MAL CLASIFICADO PRESENTANDO ARENA GRUESA, BOLEUS Y BLOQUES
10 00	Ag D	AGLOMERADOS DE CLASTOS GENERALMENTE SUBANGULOSOS DE COMPOSICION DACITICA, EMPLAZADOS EN UNA MATRIZ ARENO LIMOSA DE LA MISMA COMPOSICION
0 70	Ar D	TOBA ARCILLO LIMOSA COLOR CAFE OSCURO, COMPACTA CON CLASTOS DACITICOS
1 50	Ap G	ARENA PUMITICA DE GRANO GRUESO COLOR CAFE CLARO MUY DISGREGABLE, DE COMPACTAD BAJA Y SOLO EN SU BASE PRESENTA MATRIZ ARCILLOSA
1 50	Ar P	TOBA ARCILLO LIMOSA COLOR CAFE OSCURO, BIEN COMPACTA CON CLASTOS PUMITICOS Y FOSILES
2 50	Ap M	ARENA PUMITICA DE GRANO MEDIO BIEN CLASIFICADA Y DISGREGABLE CON LINEACIONES DE ARCILLA SIN MATRIZ Y UN ESPESOR MUY CONSTANTE HORIZONTAL EXPLOTABLE
1 30	TO	TOBA ARENO LIMOSA MAL CLASIFICADA COLOR CAFE CLARO COMPACTA CON CLASTOS DE PUMITAS
1 30	Ap Ar	ARENA PUMITICA LIGERAMENTE COMPACTA CON MATRIZ ARCILLOSA, REGULARMENTE CLASIFICADA DE GRANO MEDIO Y GRUESO
15 00	Ta	TOBA ARENO LIMOSA MAL CLASIFICADA CON CLASTOS DE ANEUSTAS, PUMITAS, DACITAS, LA COMPOSICION DE LA MATRIZ ES ACIDA COLOR ROSADO (ARENAS ROSAS)
1 00	Ap Inf	ARENA PUMITICA MAL CLASIFICADA CONTAMINADA DE ARCILLA, CON INTERCALACIONES DE TOBAS ROSADAS
20 00	Ap V	AGLOMERADOS VOLCANICOS MAL CLASIFICADOS CON CLASTOS SUBANGULOSOS Y SUBREDONDEADOS DE COMPOSICION VOLCANICA VARIABLE Y BIEN COMPACTADOS

FIG. 1.4 Columna Tipo de la Formaci3n Tarango.

1.5 Estudios del subsuelo en la zona.

Anteriormente se describieron los depósitos que conforman el perfil más general de la Formación Tarango, su conocimiento es de gran importancia para ubicar en un perfil estratigráfico obtenido en campo, las posibles capas de suelo explotables en el pasado. Las características de estos horizontes explotables se pueden correlacionar con las obtenidas en exploraciones profundas para que de esta forma se puedan definir los sitios o niveles de suelo donde es probable encontrar bocaminas o cavidades; y en caso de detectarlas, determinar su desarrollo sobre uno o más horizontes. Por lo tanto, el hecho de presentar perfiles estratigráficos de la delegación Alvaro Obregón, no implica que ésta sea la estratigrafía predominante en la zona, sino más bien con estas columnas estratigráficas y con ayuda de la columna tipo de la Formación Tarango, se pretende contribuir a la localización de horizontes granulares donde pudiera, tal vez, hallarse una cavidad.

Los perfiles estratigráficos que se presentarán, obviamente no representan el caso más general o más común, ya que son perfiles obtenidos de estudios geotécnicos de distintos sitios. Además, la abrupta topografía de la zona poniente del D.F. puede originar falsas interpretaciones estratigráficas, aún basándose en estudios previos del subsuelo.

Del análisis de algunos estudios del subsuelo realizados dentro de la delegación Alvaro Obregón, se desprende que la estratigrafía que predomina es errática, dado que con gran frecuencia una misma formación geológica adquiere, indistintamente, diversas clasificaciones en el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). Sin embargo resulta obvio que todo estudio estratigráfico en esta zona debe fundamentarse principalmente en el origen de los actuales problemas de las zonas minadas, más que en ligeras variaciones en la composición granulométrica o en la plasticidad de los suelos explorados. En consecuencia, el correcto enfoque estratigráfico proviene de la clasificación de las formaciones respecto a su factibilidad de construir fuentes naturales de agregados pétreos de sencilla y económica explotación, que sin más tratamiento posterior que su clasificación por tamaños puedan emplearse en algunas ramas de la industria de la construcción. Por estas razones y persiguiendo solo fines ilustrativos se presentan a continuación algunos perfiles que ilustran la estratigrafía obtenida en algunos estudios de mecánica de suelos realizados hasta la fecha en dicha delegación.

1.5.1 Perfiles estratigráficos.

Cabe aclarar que la descripción de los estratos detectados en los estudios del subsuelo de la delegación Alvaro Obregón al poniente de la Ciudad de México, corresponden a los detectados en cada estudio con ligeras correcciones para su mejor comprensión; en ocasiones la información es tan incompleta que no proporciona una idea clara del estrato detectado, ya que la mayoría de estos estudios sólo se enfocaron en detectar cavidades sin considerar la estratigrafía, en algunos casos no se hicieron muestreos del suelo y mucho menos pruebas de laboratorio; con estos antecedentes no es posible definir un estrato correctamente, ya que las características que lo definen como un material explotable se desconocen, por lo tanto no puede aportar una idea sobre la posible existencia u origen de una cavidad subterránea. A continuación se presentan algunos de estos estudios, su propósito, ubicación y fecha de realización, seleccionando de ellos una columna estratigráfica, la más representativa y que se incluyen en el Anexo 1 al final del presente trabajo.

Estudio 1. Av. Becerra 98 (1988).

Se llevó a cabo para detectar en el subsuelo de dicho predio, la presencia de cavidades subterráneas que pudieran afectar la estabilidad de las obras que se proyectan construir. La investigación consistió en 18 sondeos profundos, las perforaciones se ejecutaron sin recuperación de muestras utilizando para tal efecto una máquina Stenuick con martillo neumático. De estos trabajos se deduce que en el subsuelo predominan los suelos limo arenosos, en particular se detectó la siguiente secuencia estratigráfica:

- a) Material de relleno constituido por un limo arenoso o arena limosa mal compactado, esta capa se encuentra contaminada de cascajo y fragmentos de piedra proveniente de actividades de demolición. Su espesor varía entre 0.60 y 9 m. En otros sondeos exploratorios, la primera capa suele ser un limo arenoso cuya compactación varía de compacto a muy compacto y sus espesores fluctúan entre 3 y 5 m.
- b) Limo arenoso o arena limosa de compactación densa a muy densa, en algunos sitios el limo se encuentra mezclado con arena pumítica, el espesor de esta capa varía entre 2 y 3 m ubicado hasta la máxima profundidad explorada que fue de 10 m.

Estudio 2. Av. Observatorio y Sur 136, Col. Américas (1984).

Se efectuaron 3 sondeos mixtos y 31 perforaciones sin muestreo, éstas últimas se ejecutaron con el único objetivo de localizar cavernas u quejadas en el subsuelo. De acuerdo a éstos se pudo detectar la siguiente estratigrafía:

- a) Desde la superficie y hasta una profundidad de 0.90 m en promedio, se encuentra un material de relleno en estado suelto, formado por fragmentos de asfalto, concreto y arenas limosas con gravas y boleos.
- b) Subyaciendo y hasta 10 m de profundidad, en promedio, se halla un manto de arena limosa de grano grueso color gris con gravas aisladas, su compacidad es muy densa.
- c) Bajo el manto anterior y hasta la máxima profundidad explorada (15 m), se localizó un estrato de arena limosa de grano grueso color café rojizo, de compacidad muy densa, parcialmente cementada y con algunos boleos.

Como caso particular, de 15 a 15.25 m en el sondeo SM-3 se encontró arena pumilica gris que corresponde a los materiales que eran explotados en las minas subterráneas de la zona. También es importante señalar que en uno de los sondeos de verificación se detectó una caverna con altura libre de 0.80 m. En el resto de los sondeos no se observaron particularidades dignas de mencionar. Los sondeos de verificación son solo de avance a través de la rotación de la maquinaria de perforación, el único dato que reporta es un registro de la velocidad de perforación para un avance de 60 cm.

Estudio 3. Col. Ampliación la Mexicana (1978).

Previo a la ejecución de los sondeos de penetración estándar se llevó a cabo el estudio de anomalías por medio de una exploración de tipo geoelectrica. En cuanto a la exploración profunda, ésta se realizó utilizando el método de penetración estándar y avance con broca tricónica; con la investigación del subsuelo se buscaba comprobar los eventos anómalos reportados en la exploración anterior del predio, además de precisar si dichas anomalías correspondían a galerías de antiguas minas o a algún relleno depositado por el hombre, así como caídos de la propia cavidad por efecto del intemperismo y algunos otros agentes de importancia. Considerando los registros de avance y clasificación de campo de los materiales en los sondeos profundos, se detectaron las siguientes unidades de suelo:

- a) En los primeros metros y hasta una profundidad promedio de 13 m se halla un estrato constituido por arena de grano medio y compacidad muy densa, con gravas y gravillas aisladas color café claro.
- b) A continuación se sitúa una capa de arcilla arenosa de baja plasticidad y consistencia dura, en ocasiones contiene gravillas de color café claro. El espesor promedio es de 4.50 m.
- c) Por último se encontró un limo arcilloso o arcilla limosa con arenas y gravas café claro, de baja plasticidad, muy firme, de espesor variable y probablemente mayor a 3 m.

En los límites y dentro de la última unidad de suelo llegan a encontrarse pequeñas intercalaciones de arena pumítica poco cementada, de compacidad muy densa y de espesor muy reducido.

Estudio 4. Palo Alto, D.F. (1972).

Los trabajos de campo consistieron en un sondeo de penetración estándar y 10 sondeos de avance sin muestreo, éstas últimas perforaciones se efectuaron con la finalidad de detectar cavernas bajo el terreno explorado. De acuerdo a los resultados obtenidos, el subsuelo de este predio está constituido por las siguientes capas:

- a) Arcilla limosa café oscuro poco húmeda, de plasticidad media y consistencia firme, en ocasiones esta capa presenta arena fina en pequeñas proporciones. Su espesor promedio es de 30 cm.
- b) Subyaciendo a la capa anterior se encuentra un limo poco arenoso ligeramente cementado y de compacidad media, su espesor oscila entre 0.70 y 1 m.

- c) El siguiente estrato es un limo arenoso fuertemente cementado y de compacidad muy densa, al que localmente se le denomina "toba". Su espesor promedio es de 3 m.
- d) La siguiente capa es una arena pumítica de grano fino a medio con algo de limo, fuertemente cementada y de compacidad muy densa, de espesor variable entre 5 y 6.20 m.
- e) La última capa encontrada fue una arcilla limosa café claro poco húmeda, de plasticidad baja y consistencia dura. Su espesor es indefinido ya que se localizó hasta el fondo de los sondeos practicados.

Es importante mencionar que no se halló el nivel de aguas freáticas en ningún sondeo, así mismo no se reportaron variaciones importantes en cuanto a la compacidad de los materiales encontrados, no hubo pérdida de lodo, por lo tanto puede asegurarse que en los sitios explorados hasta una profundidad máxima de 10 m no se tienen indicios de cavernas.

Estudio 5. Av. Tamaulipas No. 257, Col. Santa Lucia (1986).

Uno de los principales objetivos de este estudio fue el de detectar posibles oquedades. Se llevaron a cabo 3 sondeos de penetración estándar con recuperación de muestras, la profundidad de los sondeos varió entre 10 y 20 m, además se ejecutaron 10 perforaciones de avance a una profundidad promedio de 15 m. A continuación se describe la estratigrafía detectada:

- a) Relleno artificial formado por cascajo y basura en estado suelto, su espesor varía de 0.20 a 1.50 m.
- b) Limo poco arenoso café claro, de ligera cementación y compacidad densa, la unidad contiene grumos de carbonato de calcio. Su espesor varía entre 0.10 y 1 m aproximadamente, sobre esta unidad de suelo se ha desarrollado bastante vegetación.

- c) Arena arcillosa café obscuro fuertemente cementada y de compactidad muy densa (localmente se le conoce como toba). Esta capa de suelo contiene fragmentos angulosos y redondeados de andesita. Su espesor varió entre 1 y 3 m.
- d) Arena pumítica con limo de tonalidad blanca, fuertemente cementada y de compactidad muy densa. La arena se disgrega fácilmente con presión manual, es de baja densidad y se encuentra ligeramente intemperizada. El espesor de este estrato varía de 2 a 6 m.
- e) Arcilla limosa color café, de plasticidad media y consistencia media a firme, se encuentra poco húmeda. El espesor promedio no rebasa los 5 m.
- f) Finalmente y hasta la máxima profundidad explorada (20 m) se detectó una brecha andesítica compuesta por gravas angulosas color gris claro empacadas en una matriz de arena fina a media, la compactidad es muy densa y contiene finos. El espesor de esta capa de suelo se desconoce por la unidad basal en el área de estudio.

Los sondeos de avance confirman la estratigrafía del subsuelo antes mencionada. No hubo pérdida de lodo ni caída súbita de la tubería de perforación por lo que puede preverse la ausencia de cavidades en los puntos explorados.

Estudio 6. Av. de los Constituyentes No. 1100 y 1080 (1978).

La exploración del subsuelo consideró la detección de cavernas que pudieran existir en explotaciones de material arenoso pumítico. Se programaron 5 sondeos profundos de tipo mixto cuya profundidad varió de 20 a 30 m y 3 sondeos profundos de penetración estándar con recuperación de muestras alteradas, estos últimos sondeos se llevaron hasta una profundidad máxima de 20 m. En forma complementaria y debido a la existencia de un relleno de gran espesor, se practicaron otros 5 sondeos superficiales de penetración estándar, ya que la profundidad alcanzada por los sondeos anteriores fue de 5 a 7,5 m.

Con apoyo en los registros de perforación de cada uno de los sondeos practicados en los predios bajo estudio, de las pruebas de laboratorio ensayadas y considerando las características geológicas del lugar, se estableció la siguiente correlación estratigráfica:

- a) Superficialmente se encuentra una capa de relleno heterogéneo y errático, compuesto de cascajo, ligeramente compactado, con un espesor variable de 10 a 11 m. Esta capa cubre casi la totalidad de los predios.
- b) Subyacente al relleno aparece una capa de limo arenoso (tepetate) café grisáceo, de compactidad media a densa, su espesor es variable pero nunca superior a los 10 m.
- c) Por último se halla un estrato de arena poco limosa de color gris, de compactidad media a densa, su espesor predomina hasta la máxima profundidad explorada.

En las exploraciones efectuadas no se encontró el nivel de aguas freáticas, no se detectaron grietas o cavernas subterráneas. Sin embargo es posible que la gran cantidad de relleno y el número de sondeos practicados no haya permitido su descubrimiento.

Estudio 7. Colinas de Tarango, Delegación Alvaro Obregón (1975).

Con el objeto de determinar las propiedades mecánicas de los materiales que conforman el talud y así evaluar su estabilidad, se llevó a cabo un sondeo mixto en el hombro del talud, a 20 m de profundidad, se recuperaron muestras inalteradas por medio de barril giratorio tipo Denison y muestras alteradas mediante el método de penetración estándar. Al tener conocimiento de una bocamina ubicada en la barranca oriente del terreno, se efectuó un sondeo de avance sin recuperación de muestras para determinar el espesor del techo en ese sitio, a una profundidad de 11.85 m. Al efectuarse otros 2 sondeos de avance sin muestreo, se localizaron dos cavernas, una en cada sondeo, la primera con un espesor de techo equivalente a 24.75 m y en el otro sondeo se localizó una cavidad a 8.40 m de profundidad.

La estratigrafía del predio puede describirse desde la parte superior hasta la inferior de la siguiente manera:

- a) Arena pumítica bien graduada color gris, de compactidad muy densa, poco húmeda. Su espesor promedio es de 1.60 m, se trata de la primer capa de suelo.

- b) El segundo estrato es un limo arenoso fuertemente cementado color gris de compacidad muy densa, su espesor oscila entre 7 y 8 m.
- c) A la capa anterior le subyace un estrato de arena pumítica poco limosa color gris, de compacidad muy densa, en ocasiones esta unidad de suelo presenta gravillas. Por las propiedades de este suelo se piensa que se trata del estrato explotable en galerías de antiguas minas. Su espesor no rebasa los 4 m.
- d) En algunos casos la capa siguiente está formada por boleos y gravas con poca arena color rojizo y compacidad muy densa, su espesor promedio es de 2.50 m.
- e) A continuación se halla un estrato de arena pumítica limosa con gravillas, color gris, de compacidad muy densa y de 5 a 6 m de espesor promedio, sus propiedades son semejantes al estrato explotable del inciso c).
- f) Hasta la máxima profundidad explorada existe un limo arenoso color gris con gravillas de compacidad muy densa. Su espesor es indefinido ya que se detectó hasta el fondo de los sondeos profundos.

Estudio 8. Camino Real a Toluca No. 1150, 1a. Etapa (1982).

La investigación del subsuelo, tuvo como propósito detectar por medio de sondeos rotatorios sin recuperación de muestras, la existencia de antiguas oquedades. Para tal fin se llevaron a cabo 61 sondeos de verificación de 8 a 20 m de profundidad distribuidos de la siguiente manera: 51 perforaciones a 15 m de profundidad, 1 a 18 m de profundidad y algunos sondeos superficiales (pozos a cielo abierto) cuya profundidad varió de 2.50 a 4 m. De los sondeos efectuados se comprobó la existencia de tres estratos muy representativos de la zona, a saber:

- a) Superficialmente existe material de relleno formado por un limo arenoso con gravillas, ligeramente compactado, de muy variadas tonalidades, esta unidad de suelo puede alcanzar espesores hasta de 7 m.

- b) Subyaciendo al relleno se encontró arena limosa o limo arenoso café claro de compacidad densa, poco húmeda (toba). Su espesor promedio es de 6 m.
- c) La última capa de suelo, que en algunos casos sustituye al estrato anterior está constituida por una arena con grava de compacidad media a densa, su espesor varía entre 7 y 10 m.

Estudio 9. Av. 5 de Mayo No. 290 Col. Merced Gómez (1986).

La exploración del subsuelo consistió en 3 sondeos de penetración estándar a 30 m, 15 m y 22 m de profundidad respectivamente. La estratigrafía encontrada se describe a continuación.

- a) Material de relleno constituido por arcilla limo arenosa gris oscura poco húmeda, medianamente compactada, su espesor varía entre 8 y 17 m, esta diferencia tan notable se debe a la topografía del sitio en estudio. En algunos casos la unidad de suelo presenta pedacería de tabique o material producto de demoliciones.
- b). Arena limosa gris claro, mal graduada fuertemente cementada, de compacidad muy densa. En esta unidad de suelo no se logró el avance a través del método de penetración estándar, sino que se requirió de la rotación del equipo para lograr el avance y continuar con la ejecución del sondeo. El espesor de esta capa de suelo varía entre 2 y 5.50 m, en repetidas ocasiones el estrato presenta boleos.
- c). Limo arenoso café claro, fuertemente cementado y de compacidad densa a muy densa. El registro del número de golpes para penetrar este estrato rebasa los 50 y a veces alcanza los 100 golpes. Su espesor es indefinido porque se encuentra a la máxima profundidad explorada.

Estudio 10. Esquina de la calle Henequén y Bondojito, Col. Hidalgo (1984).

El estudio se realizó con el propósito de determinar el tipo de cimentación más apropiado para la estructura aquí proyectada. Se efectuaron 4 sondeos exploratorios a 15.7 m de profundidad, se alternó el muestreo con la herramienta de penetración estándar y el avance sin muestreo con broca tricónica. Considerando los resultados de campo y las pruebas de laboratorio, se detectó la siguiente secuencia estratigráfica:

- a) Material de relleno constituido por arena limosa color café claro, medianamente cementada, de compacidad suelta a media y poco húmeda. El estrato de suelo se encuentra contaminado de grava gruesa así como de fragmentos de concreto y tabique. Su espesor es de 10 m.
- b) Arena pumítica gris claro fuertemente cementada y de compacidad densa. Su espesor promedio es de 2 m y cabe mencionar que solo en uno de los sondeos realizados se detectó este estrato.
- c) Limo arenoso o arena limosa café claro, de compacidad muy densa. La unidad de suelo se encuentra fuertemente cementada y ligeramente contaminada de arcilla. Los espesores de esta capa de suelo varían entre 5 y 5.50 m.

Estudio 11. Pilares No. 5 Col. Las Águilas (1974).

El presente estudio se realizó con el objeto de determinar si el subsuelo del predio se encontraba afectado por rellenos o galerías de antiguas minas de arena. La exploración del subsuelo consistió en 7 perforaciones sin muestreo cada una de ellas llevadas a 10 m de profundidad. Las perforaciones se realizaron en húmedo, con broca tricónica registrando el tiempo requerido para avanzar tramos de 60 cm, así como la pérdida de agua y/o caída súbita de la tubería de perforación.

El subsuelo explorado está formado por arenas limosas con gravas y gravillas. La arena se presenta en colores café grisáceo y gris oscuro. En tres de los sondeos exploratorios se encontró un relleno superior formado por limo arenoso con cascajo y pedacería de tabique.

Estudio 12. Calz. Las Agullas No. 453 (1974).

El propósito principal de esta investigación consistió en determinar si el subsuelo se encontraba afectado por galerías de antiguas minas de arena. Para esto se realizó un sondeo mixto continuo a 30.15 m de profundidad del cual se obtuvieron muestras alteradas e inalteradas de suelo, bajo las normas del método de penetración estándar y utilizando barril doble swivel, tipo Denison respectivamente. La exploración para la detección de cavernas se complementó con 5 perforaciones sin muestreo a 30 m de profundidad cada una. Considerando la clasificación de campo y los resultados de los ensayos efectuados, se deduce la siguiente estratigrafía:

- a) Material de relleno compuesto por limo arenoso con poca arcilla y pedacería de tabique así como fragmentos de concreto, el material se encuentra suelto, su espesor es variable y nunca rebasa los 3 m.
- b) Subyace una arena limosa poco arcillosa de compacidad muy densa, la unidad de suelo está fuertemente cementada y poco húmeda. Su espesor varía entre 12 y 30 m.
- c) En ocasiones se aprecia una capa de limo arenoso de compacidad media a densa fuertemente cementada. Esta capa de suelo alcanza espesores que van de 3 a 15 m.

De la investigación realizada se confirmó que no existen cavernas dentro del predio, sin embargo se efectuó la inspección directa de algunas galerías de antiguas minas muy cercanas al predio estudiado, llegando a la conclusión que la posición y desarrollo de estas cavidades no afectan al lote investigado.

Estudio 13. Camino Real a Toluca No. 1150, 2a. Etapa Santa Fe Tacubaya (1982).

Se realizó para investigar la presencia de minas subterráneas que pudieran afectar la estabilidad de los edificios a construir. Posterior a varios trabajos como el recorrido directo por la zona, el análisis fotogramétrico y un estudio geofísico, se programaron 13 sondeos rotatorios sin recuperación de muestras a 15 m de profundidad en los sitios que reportaban valores de resistividad muy elevados en los sondeos geoeléctricos. A saber, en el subsuelo se detectaron las siguientes capas de suelo:

Superficialmente se encontró una capa de relleno compuesto por un limo arenoso contaminado de arcilla y cascajo, ligeramente compactado a bien compactado conforme aumenta la profundidad. Este estrato presenta espesores variables entre 1 y 10 m.

Subyaciendo a la capa de relleno se puede hallar uno de los siguientes estratos:

- a) Limo arenoso fuertemente cementado de compactación densa a muy densa (localmente se le conoce como "toba"), su espesor mínimo es de 3 m y puede alcanzar espesores que rebasan los 15 m, ya que en algunos casos esta capa de suelo se extiende hasta la máxima profundidad explorada.
- b) Arena empacada en una matriz de grava gruesa con limo, erráticamente cementada y de compactación media. Su espesor varía de 2 m hasta más de 10 m debido a que este estrato en repetidas ocasiones se localiza hasta la máxima profundidad explorada.

De este estudio se pudo corroborar la existencia de dos cavidades poco profundas en las cuales se recomienda regenerarlas mediante la excavación y relleno compactado porque se encuentran a poca profundidad.

Estudio 14. Camino de las Minas y calle Nicanor Arvide (1974).

El presente estudio se llevó a cabo para definir el tipo de cimentación más apropiado para las estructuras a edificar. Se practicaron 15 sondeos profundos de penetración estándar con recuperación de muestras y avance con broca tricónica, de los cuales se deduce la siguiente estratigrafía:

- a) Superficialmente se halla una capa de relleno constituida por cascajo y materiales provenientes de demoliciones cercanas, el espesor de esta capa varía entre 11 y 21 m, esta unidad de suelo se atravesó empleando broca tricónica y ademandando las paredes con tubo metálico.
- b) Subyaciendo al material de relleno se encuentran limos, arcillas y arena mezclados entre sí, la compacidad de estos materiales puede catalogarse alta, localmente se le conoce al material como "tepelate", este estrato presenta un espesor de 2 m.
- c) A la máxima profundidad explorada aparece una arena pumítica de grano fino fuertemente cementada, de compacidad muy densa, su espesor es indefinido.

Es importante señalar que dentro del predio se encuentran dos cavernas que son producto de la explotación de los mantos de arena pumítica, siendo probable la existencia de otras oquedades.

Estudio 15. Santa Lucía No. 810 Col. Olivar del Conde (1989).

El propósito de esta investigación es el de conocer las características del subsuelo para con ello evaluar la factibilidad de cimentar los inmuebles que se proyectan. Para esto se practicaron 4 sondeos profundos alternando el método de avance con broca tricónica y la penetración estándar con recuperación de muestras, se alcanzaron profundidades variables, a saber, entre 31.5 y 33 m. Los estratos encontrados se describen a continuación:

- a) La capa superficial es un relleno heterogéneo de arcillas y limos arenosos revueltos con basura, cascajo y productos de demoliciones, compactados. El espesor de este estrato es del orden de 30 m en promedio.
- b) La siguiente capa de suelo suele ser alguno de los materiales que se describen a continuación.

Arena pumítica café claro de compacidad muy densa y que puede alcanzar espesores de hasta 3 m.

Arena limosa de grano fino color gris fuertemente cementada y de compacidad densa, su espesor puede resultar mayor a 4 m, este suelo se localizó hasta la máxima profundidad explorada.

Por encuestas realizadas a los habitantes de la zona, se supo que la capa de relleno descansa sobre el piso de una antigua mina de arena azul andesítica, explotada a cielo abierto; esta información no pudo comprobarse en la exploración del subsuelo, en la que se llegó a una profundidad máxima de 33 m rebasando el espesor del relleno, no se descarta la posibilidad de dichas anomalías en el terreno estudiado.

Estudio 16. Calle Paralela 7 S/N, Col. Molino de Santo Domingo (1974).

La investigación del subsuelo consistió en definir si este predio se encontraba afectado por galerías de antiguas minas, para evaluar su estabilidad o los procedimientos necesarios para tratarlas. El estudio y exploración se realizó en dos etapas: en la primera se ejecutaron 21 sondeos, hasta profundidades comprendidas entre 15 y 19.20 m y en la segunda etapa se efectuaron 11 sondeos, de 10 a 11.20 m de profundidad. En todos los sondeos exploratorios se empleó una perforadora rotatoria con broca tricónica como herramienta de avance. De los sondeos profundos se deduce la siguiente secuencia estratigráfica:

- a) Como primer capa se halló un limo arenoso conocido localmente como "toba", su espesor varía entre 1 y 10 m. En algunos casos esta capa de limo subyace a un estrato de arena limosa con grava cuyo espesor va de 1 a 7 m, o también, a un material de relleno de espesor reducido menor a 1 m.

- b) El siguiente estrato es una arena limosa de espesor no menor a 10 m puesto que pudo hallarse hasta la máxima profundidad explorada; en algunos sondeos el perfil estratigráfico se compone solo de esta unidad de suelo.

También se realizó una inspección directa en los múltiples accesos a cavidades por los cantiles existentes al norte del predio, llegando a la conclusión que las cavernas así detectadas son de longitud reducida, del orden de 30 m y dada su posición, no afectan al predio, así lo demuestran de igual forma los sondeos profundos al no detectar estas anomalías.

Estudio 17. Fraccionamiento Lomas de las Agullas (1974).

Se realizaron sondeos de exploración tendientes a determinar la posible existencia de cavernas en los terrenos del fraccionamiento. La exploración profunda consistió en 21 sondeos de avance, 3 sondeos con recuperación de muestras si como dos perforaciones de 24 pulgadas de diámetro a 6.50 y 12 m de profundidad, estas dos últimas se ejecutaron con el propósito de realizar la inspección directa de algunas cavernas detectadas en el resto de los sondeos profundos. En base a la exploración realizada, la estratigrafía general del predio está constituida por alguno(s) de los siguientes estratos:

- a) Limo arenoso de compacidad media a densa erráticamente cementado, su espesor varía de 5 a 12 m.
- b) En algunos casos, como capa superficial se halla una arena de grano fino a medio fuertemente cementada, empacada en una matriz arcillosa, su compacidad es muy densa y ocasionalmente se detectan boleos, la unidad de suelo llega a alcanzar espesores mayores a 15 m extendiéndose hasta la máxima profundidad explorada.
- c) La unidad de suelo más común en los perfiles estratigráficos es una arena limosa (toba) fuertemente cementada y de compacidad muy densa, su espesor puede resultar mayor de 2 m puesto que en algunos casos se halla al final de los sondeos practicados. Esta capa de suelo suele presentarse intercalada en uno de los estratos antes mencionados.

En 4 de los sondeos ejecutados se detectaron oquedades con alturas variables como: 0.25 m, 1.00 m, 3.70 m y 1.18 m, al realizar la inspección directa se comprobó que no corresponden a galerías de antiguas minas de arena. Para apoyar más esta conclusión se realizó una exploración de tipo geoelectrica, la cual reporta que no existen anomalías eléctricas que pudieran indicar la posible existencia de cavernas bajo otros sitios del subsuelo explorado hasta una profundidad de 15 m. El estudio además contempla como etapa posterior el levantamiento topográfico interno de las oquedades encontradas en los sondeos profundos.

CAPITULO 2

RECONOCIMIENTO DE CAVIDADES

2.1. Introducción.

Una gran parte del subsuelo del poniente de la ciudad de México se caracteriza por la presencia de estratos de arena y grava azul, localizados a profundidades y espesores variables. Por esta razón, antiguamente éstos horizontes de materiales granulares fueron explotados y aprovechados en la industria de la construcción, debido principalmente a su cercanía con el centro urbano de la ciudad de México. Cabe señalar que la explotación de estos materiales se realizó en forma irracional, ya que su desarrollo obedeció simplemente a la facilidad y rapidez para obtener el mayor volumen de agregados pétreos y obviamente sin pensar que a futuro, en esta zona quedaría asentada gran parte de la población debido al desarrollo urbano de la ciudad.

En la actualidad la construcción de la infraestructura necesaria para el desarrollo del D.F. (Sistema de Transporte Colectivo, Drenaje Profundo, Vialidades, etc.) y el mantenimiento de las obras ya existentes, se enfrentan a la problemática planteada por la existencia de oquedades; por esta razón resulta imprescindible localizar las minas subterráneas comprendidas en la delegación Alvaro Obregón, debido a que la estabilidad de las estructuras y las soluciones en cimentaciones de las construcciones están regidas por la presencia y ubicación de dichas discontinuidades.

Por lo tanto, antes de hablar de los métodos utilizados para la detección de cavidades y que se tratarán en este capítulo, resulta importante resumir el origen y naturaleza de algunas oquedades artificiales, detectadas hasta este momento, pues a partir de su conocimiento se podrá orientar mejor su búsqueda. De las cavidades alojadas en las formaciones volcánicas del poniente de la Ciudad de México, se puede advertir lo siguiente:

- Todas son de origen artificial, con dimensiones que varían de 1.5 a 2.0 m tanto en altura como en ancho.
- Comúnmente las minas tienen su origen en barrancas o cortes, en cuyas laderas pudieron reconocerse los mantos o lentes de materiales útiles para la construcción, tales como: grava, arena y pómez, cuyas propiedades permitían su empleo más o menos directo, sin recurrir a procesos elaborados de trituración o selección.

- La explotación se efectuó a través de túneles o galerías, cuyo desarrollo variaba desde un solo túnel sencillo, hasta una verdadera red intrincada y compleja, ubicada en un mismo manto o en varios situados a diferentes niveles. En algunos salones, las propiedades de los materiales en su bóveda permitieron salvar claros muy grandes, del orden de 10 m o más, con alturas hasta de 4 m sin apoyos intermedios, o bien limitar sus tramos sin soporte mediante pilares intermedios labrados.
- Con el paso del tiempo los materiales de las bóvedas suelen alterarse y debilitarse, produciéndose derrumbes que más tarde pueden ser arrastrados por agua infiltrada, de donde una o varias porciones de las minas pueden estar parcial o totalmente rellenas por estos derrumbes y sedimentos.

La importancia de la investigación de las minas es evidente si se considera que, una vez localizadas y definidas, el tratamiento que se adopte para su regeneración estará basado en los informes obtenidos. Por el contrario, cuando las cavidades del subsuelo pasan inadvertidas, por falta o deficiencia de estudios, casi invariablemente con el tiempo las construcciones localizadas sobre estas anomalías o muy cerca de éstas, experimentan daños que pueden ser desde simples agrietamientos hasta la falla total de las estructuras, que implica no sólo las inevitables pérdidas económicas y materiales, sino hasta pérdidas de vidas humanas. Por lo anterior, no se considera como criterio sano que, por falsa economía, se descarten o se limiten los estudios necesarios.

La forma de investigar cavidades subterráneas se va modificando con el tiempo, en función de los avances tecnológicos, con el objeto de obtener la misma o mejor información a menores costos. Por tanto, los métodos de exploración que se expondrán en este trabajo, son los que en la actualidad resultan más usuales, con un enfoque particular en la investigación de zonas minadas en la ciudad de México, considerando el desarrollo técnico y económico del país.

En el estado actual del avance de la técnica, el problema de la detección de cavidades dista mucho de estar totalmente resuelto, y no existe un método único, eficaz y seguro para este fin. Los conocimientos de COVITUR avalan este hecho, pues su experiencia en este tipo de trabajos les ha permitido observar, que ningún método o técnica aplicada individualmente, proporciona resultados positivos en la resolución de la problemática planteada, sino por el contrario, sólo su conjunción, ha hecho posible lograr un mejor conocimiento de esta problemática y de su solución. Por tanto, todos los métodos que a continuación se tratarán tienen sus propias limitaciones, así como sus desventajas en determinadas situaciones.

Expuesto lo anterior, cabe mencionar que en este capítulo se habla de la fotointerpretación, como una etapa cuyo propósito será conocer a través del tiempo los cambios morfológicos del subsuelo, y así tener una idea aproximada del problema. Se marcarán los pasos a seguir en un reconocimiento superficial del sitio. Por otra parte, se describen los métodos de exploración para detectar zonas minadas, los realizados para extraer muestras que permitan conocer las propiedades de los estratos existentes en una cavidad y las especificaciones técnicas de los equipos usados; además del método de resistividad eléctrica para inferir la existencia de cavidades subterráneas. Cabe aclarar que estos métodos son útiles en la detección de cavidades y no significa que resuelvan del todo el problema, más bien, dan una idea aproximada respecto a la existencia de cavidades en el subsuelo que se estudia.

2.2. Estudio de fotointerpretación.

Al tratar de identificar zonas minadas, se deberá efectuar un estudio de fotointerpretación; el cual consiste en observar a través de un estereoscopio fotografías aéreas tomadas en diversas épocas, para reconstruir la historia y los procesos de ataque a que pudo estar sometido el sitio de interés. Para este efecto existen fotografías aéreas de la ciudad de México, tomadas a intervalos de 2 a 3 años a partir más o menos del año de 1940. Por lo tanto, por medio de pares estereoscópicos de diferentes fechas, se tratará de reconstruir los eventos que se suscitaron en una zona determinada.

Para este caso particular, la fotointerpretación se basará en la observación de pares estereoscópicos, en donde se debe procurar identificar caminos de acceso a frentes de explotación de materiales pétreos, en los que puede ser probable la existencia de una cavidad.

A partir de la fotointerpretación, complementada con apoyo terrestre, se pueden definir los accesos a las galerías de antiguas minas, el desarrollo de las explotaciones a cielo abierto y la configuración original de las zonas actualmente rellenas. Se podrá determinar además, la época en que se suspendió su explotación y los cambios morfológicos asociados a la urbanización de los predios.

El estudio de fotointerpretación debe complementarse con la inspección física de las laderas y con la clasificación geotécnica y geológica de los afloramientos.

2.3 Reconocimiento superficial del sitio.

Apoyado en la fotointerpretación, debe realizarse una inspección física del sitio en estudio, la cual podrá dar inicio con la demarcación del área de interés. Es aconsejable desde luego, que se delimite en forma preliminar a partir de un recorrido rápido y somero de la zona, para afinar posteriormente su extensión conforme se avance en el reconocimiento.

Podrán efectuarse encuestas a los habitantes de la zona, para tenerlas como antecedentes que nos permitan orientar y llevar a cabo el reconocimientos del sitio en el menor tiempo posible, desde luego que éstos datos también pueden aprovecharse como información complementaria. El propósito de las entrevistas será tener la información suficiente sobre la existencia de minas en el área de estudio, procurando recurrir a personas que tengan más tiempo viviendo en el sitio y en áreas circunvecinas.

El reconocimiento consistirá en el recorrido detallado del área en cuestión, prestando especial cuidado a las barrancas, cañadas y cortes cercanos, para investigar la existencia de bocas de minas, así como de rellenos, muros y construcciones que pudieran ocultarlas. Aunque usualmente las bocaminas son de acceso lateral en laderas, no debe descartarse la existencia de las de tiro vertical o inclinado en terrenos de superficies más o menos horizontales.

Al inspeccionar las laderas de barrancas y cortes se buscará la presencia de capas de arena, grava y materiales pumfílicos que fueron o pudieron haber sido objeto de explotación subterránea, anotando su espesor medio y su profundidad aproximada respecto a la superficie del terreno.

En caso de encontrar bocas de minas en el área, será necesario inspeccionarlas para determinar su desarrollo y verificar si afectan o no al predio. El recorrido de las minas servirá para conocer su estado actual y condiciones de acceso, con miras a programar su exploración y estudio.

Resulta necesario apoyarse en ocasiones de la topografía, para establecer el desarrollo de la cavidad y la ubicación de los predios en estudio, para establecer si se encuentran afectados por cavidad(es) subterránea(s).

Otro aspecto importante del reconocimiento es el examen de evidencias superficiales de colapso o situación precaria de bóvedas de minas. Estas evidencias pueden ser hundimientos y grietas del terreno, así como daños que acusen las construcciones existentes.

Además de la existencia de minas deberá investigarse en el recorrido del lugar la ocurrencia de otros problemas comúnmente asociados con ellas, como es la presencia de rellenos superficiales, que suelen encontrarse en estado suelto y que pudieran ser producto de la demolición de bóvedas de cavidades preexistentes; asimismo, investigar la existencia de fenómenos de inestabilidad de laderas en barrancas y cortes, que llegan a originarse por la falla de los techos de minas que de ellas arranquen.

Es recomendable que los resultados del reconocimiento superficial se presenten en un informe escrito que incluya un croquis del área de estudio, en el que se marque la posición relativa de barrancas y cortes, bocaminas, zonas de rellenos, hundimientos, grietas, etc. También es aconsejable incluir un informe fotográfico en el que se ilustren las condiciones y peculiaridades del área investigada.

Cuando del estudio de fotointerpretación y del reconocimiento superficial se llegue a concluir categóricamente que no existen minas, la investigación puede considerarse terminada o puede procederse a otra fase de exploración, utilizando alguno(s) de lo(s) método(s) que se tratarán en los subcapítulos siguientes.

2.4. Métodos de exploración en zonas minadas.

Se aplicarán cuando el reconocimiento superficial previo indique la existencia dudosa o comprobada de minas en el área, para tal efecto se llevará a cabo su exploración aplicando uno o la combinación de los métodos más usuales para inferir la existencia de cavidades.

Cabe aclarar que el orden en el que aparecerán éstos métodos, no indica la secuencia para su ejecución, sino más bien se exponen así, para que acorde a la experiencia del ingeniero especialista, sea éste el encargado en definir en cual(es) de ellos basará su investigación o en todo caso precise el orden en el que se llevarán a cabo todas sus actividades, enfocadas al simple objetivo de la detección de cavidades. Es importante señalar que esta clasificación se propone exclusivamente para efectos de exploración de cavidades. Así entonces, se cuenta con tres métodos diferentes para lograr el objetivo que se persigue en este capítulo, estos métodos son:

- Métodos directos.

Están basados en observaciones y mediciones hechas desde el interior de las cavidades, o bien en excavaciones o perforaciones de tamaño tal que en ellas penetre una persona.

- Métodos semidirectos.

Consisten en realizar perforaciones de pequeño diámetro desde la superficie del terreno, en estos sondeos se incluyen las mediciones, obtención de muestras y observaciones realizadas en la exploración a partir de la superficie del terreno.

- Métodos indirectos.

Se apoyan en procedimientos geofísicos, aplicados también desde la superficie o en el interior de sondeos previamente practicados.

Los métodos y factores que favorecen su aplicación en la práctica, se tratarán por separado en los siguientes apartados.

2.4.1 Métodos directos.

Estos métodos están basados en una serie de actividades en el interior de las minas, una vez que se detectaron los accesos mediante el reconocimiento superficial, el objetivo primordial consiste en ubicar las anomalías con respecto al área o predio en estudio y así definir si en realidad lo afectan.

Cuando en el reconocimiento superficial no fuera posible determinar si las minas afectan al predio o área determinada, se procederá a realizar un levantamiento topográfico en planta de una poligonal por el o los ejes de las galerías, el cual deberá ser preciso, y apoyarse en puntos superficiales que permitan referirlo a la posición del predio. Cuando la sección transversal de los túneles sea más o menos constante, bastará con medir su anchura promedio.

Simultáneamente, se localizarán y referirán aquellas partes de las minas donde existan derrumbes, rellenos y sedimentos depositados por agua infiltrada, que impidan físicamente o hagan peligroso el acceso. Para no impedir la continuación del levantamiento podrán llevarse a cabo trabajos de limpieza, excavación, obras de protección y además provisionales en el interior de las cavidades. En ocasiones se presentan otros problemas como la existencia de agua u olores mefíticos, éstos pueden resolverse empleando bombeo convencional o haciendo que circule aire.

Puede ocurrir que del levantamiento se concluya que las minas se encuentran ubicadas en el subsuelo del predio, si así sucediera, será necesario afinarlo, levantando en detalle el contorno de las cavidades en las zonas que interesen, y efectuando una nivelación cuidadosa del piso y clave de las minas de estas zonas. Será indispensable que, tanto en planimetría como altimetría, este levantamiento detallado de las minas se ligue debidamente al levantamiento topográfico superficial del predio, para lo cual se efectuarán excavaciones o perforaciones que atraviesen las bóvedas de las cavidades, localizadas en forma conveniente.

A continuación, deben inspeccionarse de manera minuciosa las cavidades para conocer su estado de alteración y las características de los materiales que forman parte del techo, paredes y piso de estas anomalías. En algunos casos existen fisuramientos en el techo o alteraciones en lo que son los pilares.

Los resultados del levantamiento directo pueden presentarse en un informe escrito, incluyendo los planos de las minas en planta y elevación, así como secciones típicas y fotografías del sitio. Cuando la totalidad de las minas o la parte que de ellas interesa haya sido accesible, y su levantamiento realizado en forma satisfactoria, estos trabajos serán suficientes para estudiar la mejor solución en cuanto a su tratamiento y regeneración.

Si el levantamiento total de las minas o de su parte que afecta al predio no fuera posible, o bien si el reconocimiento previo indicará que persiste la posibilidad de que otras minas no accesibles pudieran estar dentro de éste, se recurrirá a los métodos semidirectos o indirectos según convenga el caso.

2.4.2 Métodos semidirectos.

Consisten en realizar perforaciones de pequeño diámetro desde la superficie del terreno, de las cuales, pueden hacerse las observaciones y mediciones necesarias. Estos métodos pueden usarse en los casos en que el reconocimiento superficial no haya permitido asegurar la ausencia de minas en el área de estudio, o bien cuando las condiciones actuales de éstas no permitan su exploración directa, o como complemento de la investigación de cavidades. La aplicación de estos métodos puede resultar conveniente en casos particulares como los siguientes: en predios de dimensiones reducidas limitados por colindancias, en aquellos sitios que en la actualidad estén cubiertos totalmente por construcciones, en predios con hundimientos o grietas en la superficie y hasta para investigar la causa del mal comportamiento y daños de estructuras ya construidas. Los métodos semidirectos pueden resultar también un apoyo o estudio complementario en la investigación de anomalías previamente detectadas por métodos geofísicos.

Dentro de los métodos semidirectos para la detección de cavidades, se puede mencionar principalmente a las perforaciones sin recuperación de muestras. Cuando dentro de los alcances de la investigación además se contempla la recuperación de muestras para conocer sus propiedades y definir la estratigrafía en un sitio particular, se recurrirá a la penetración estándar y/o a la obtención de muestras inalteradas con barril Denison. Todos éstos métodos tienen una limitante común, ya que son exploraciones en un solo punto y los sitios elegidos para su ejecución pueden caer fuera de las cavidades que se desea de antemano detectar. Por tanto, la investigación de estas discontinuidades mediante este tipo de sondeos bajo un área de cierta extensión, dependerá de la densidad o número de ellos efectuado por unidad de área, previendo que la longitud de estos sea la apropiada.

2.4.2.1 Perforaciones sin muestreo.

Este tipo de sondeos se llevarán a cabo cuando el único propósito de la exploración sea la detección de cavernas. La práctica más común ha sido utilizar máquinas de perforación que se han diseñado para dos objetivos distintos:

a) Para exploración minera y geológica, en la que predomina la perforación en roca y frecuentemente se realiza desde túneles y galerías; se requieren máquinas capaces de desplazarse en laderas, con velocidades de rotación mayores de 700 rpm, de preferencia compactas y en las que la longitud de carrera del vástago de perforación no tiene mucha importancia (la máquina Longyear de la tabla 2.1, es un ejemplo típico de esas perforadoras mineras).

b) Y para exploración geotécnica se han desarrollado máquinas montadas en vehículos o remolques de gran movilidad, con velocidades de rotación menores de 800 rpm y longitud del vástago de perforación mayor de 1.5 m (sus características se presentan en la tabla 2.1).

Dentro del equipo complementario para estas máquinas perforadoras, está la bomba de presión que debe ser capaz de operar con lodos bentoníticos. Las bombas más comunes son las de cavidad progresiva descritas en la tabla 2.2. sin embargo, para sondeos poco profundos (h menor que 50 m) se han venido utilizando bombas centrífugas de alta presión, sabiendo que sus impulsores quedan sujetos a un desgaste importante. También se cuenta con las barras de perforación cuyas características aparecen en la tabla 2.3. Las barras EW se utilizan para la penetración del cono eléctrico, las AW y BW son las de empleo más general.

Actualmente, la perforación a rotación con broca tricónica de 7.5 a 10 cm de diámetro es la técnica más común para la ejecución de sondeos, se utiliza como fluido de perforación al agua o lodo bentonítico que genera: a) un incremento de presión hidrostática debido al peso de la columna del fluido comprendido entre el brocal de la perforación y la posición del nivel freático; y b) períodos de presión hidrodinámica, cuya magnitud es función de la capacidad de la bomba utilizada.

Enfocada esta técnica al único objetivo de detección de cavidades, durante su ejecución, el operador del equipo percibe la presencia de alguna discontinuidad cuando la columna de barras baja bruscamente y al mismo tiempo se pierde el agua de perforación.

Tabla 2.1 Características de las máquinas de perforación.

Máquina	Peso (kg)	Capacidad (m)		Fuerza de Impacto (kg)	Velocidad Rotacional (rpm)	Perforación (kg-m)	Carga (kg)	Consumo (l/h)
		Profundidad	Diametro NW					
Longyear (*) Mod. 34	1130	-	260	3200	22 - 1510	-	0.60	36
Mobile Drill Mod.133	1826	75	300	8588	27 - 716	824	1.20	97
Mobile Drill Mod.B61	3721	90	450	4800	65 - 850	1230	1.70	97
Acker Mod. AD II	2310	76	300	7200	55 - 553	632	1.80	50
Acker Mod. MP60	1996	46	300	3200	43 - 287	518	1.80	48
SINCO Mod. 2800 Hs.	1200	35	90	2950	0 - 300	207	1.90	32
CME Mod. 55	2720	75	300	7257	100 - 650	970	1.80	-
CME Mod. 45	1280	45	150	4080	75 - 475	414	1.70	36

(*) Máquina para exploración minera y geológica.

Tabla 2.2 Características de las bombas.

Modelo	Tipo	Gasto (l/min)	Presión (kg/cm ²)	Potencia (hp)	Díametro (pulg)	Manija
Moyno Mod. 3L6	Cavidad progresiva	162	16	7.50	3 X 2	Lodos densos
Barnes Mod. Caracol	Centrífuga de alta presión	150	8	10	3 X 2	Lodos medios

Tabla 2.3 Medidas de las barras de perforación más usuales.

	Ø _a (pulg)	Ø _b (pulg)	Ø _c (pulg)	Ø _a (mm)	Ø _b (mm)	Ø _c (mm)	Ø _a (pulg)	Ø _b (pulg)
EW	1 3/8	34.9	7/8	22.2	7/16	12.7	4.6	3
AW	1 23/32	44.4	1 7/32	30.9	5/8	15.9	6.5	3
BW	2 1/8	54.0	1 3/4	44.5	3/4	19.0	6.2	3
NW	2 5/8	66.7	2 1/4	57.2	1 3/8	34.9	8.0	3

Longitud estándar: 3.05 m (10 pies)

Ø_a diámetro exteriorØ_b diámetro interiorØ_c diámetro interior del cople

La necesidad de reducir los costos de la exploración obliga a analizar críticamente estos y otros procedimientos de perforación con muestreo, que se emplean para la exploración de cavernas.

Alternativamente, este tipo de investigaciones podrán llevarse a cabo con una máquina neumática con broca tipo Drag con la cual puede alcanzarse una excelente eficiencia y, por tanto, menor costo de perforación (fig. 2.1). Con ella se tiene también la opción del uso del martillo neumático de 80 mm; con esta herramienta se puede operar en tobas muy duras o bloques de roca (fig. 2.2). La acción del martillo se hace con aire a una presión de 5 kg/cm² y velocidades de rotación de 45 rpm.

El procedimiento para identificar una caverna consiste en observar el cambio de intensidad del ruido durante la perforación y la ausencia de retorno de aire; cuando esto ocurre se debe suspender la inyección de aire y operar únicamente con el mecanismo elevador para determinar la altura de la cavidad.

La mayor dificultad que se ha tenido en las pocas experiencias realizadas con esta técnica es la falta de habilidad de los operadores, lo que obliga a mantener una supervisión muy cuidadosa: aún así, el rendimiento que se ha logrado en las zonas minadas es hasta de 12 m/h, sin duda muy superior a lo que puede alcanzarse con otros métodos de perforación.

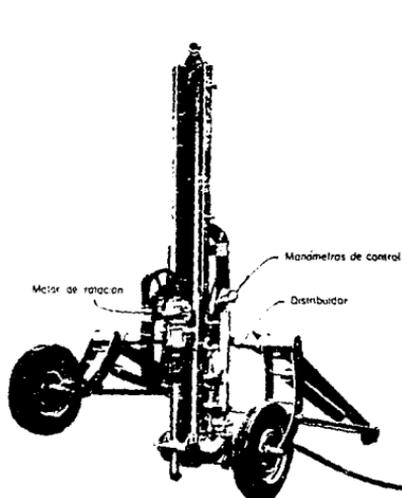


Fig. 2.1 Perforadora neumática (Stenuick)

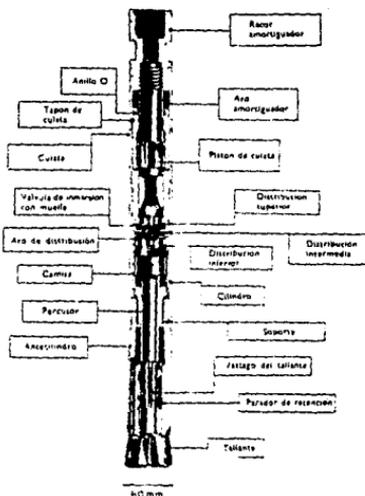


Fig. 2.2 Martillo neumático.

2.4.2.2. Perforaciones con muestreo.

Se realizarán cuando además de investigar la existencia de cavidades sea indispensable conocer la estratigrafía y propiedades del subsuelo. Dadas las características de las formaciones que constituyen los lomeríos del poniente de la Ciudad de México, los procedimientos de muestreo más usados en este tipo de sondeos han sido la penetración estándar para la recuperación de muestras alteradas y el empleo de barriles de gran diámetro, tipo Denison, para la obtención de muestras inalteradas.

En lo que respecta a la longitud de los sondeos, ésta deberá definirse en función de la profundidad del nivel inferior de cavidades probables o existentes en el sitio; si así lo demostrara el reconocimiento superficial, o en caso contrario, ejecutar los sondeos hasta una profundidad no mayor a la altura de las barrancas o cortes más cercanos, en los que se sospecha de accesos de antiguas minas. Para el caso de terrenos más o menos planos o en zonas urbanizadas, donde no sea posible aplicar el criterio anterior, conviene iniciar la exploración con uno o varios sondeos con muestreo relativamente profundo, para investigar la presencia de capas de materiales explotables, pudiendo determinar posteriormente la longitud del resto de los sondeos conforme a la posición relativa de estos mantos.

Independientemente del método de perforación empleado, los sondeos deben estar a cargo de personas con experiencia en este tipo de trabajos, observando cuidadosamente y en todo momento aspectos indicativos de la existencia de oquedades o cavidades rellenas. Tratándose de sondeos a rotación, es importante observar la pérdida del agua de perforación y el asentamiento súbito de la máquina perforadora, que deberá estar apoyada en todo momento en el varillaje y broca, y ésta a su vez en el fondo del sondeo.

En el momento de encontrar una cavidad se suspenderá la perforación para medir con cuidado su altura libre, y a partir de su piso podrá aplicarse el procedimiento de penetración estándar y/o el muestreo inalterado para investigar la presencia y espesor de material suelto (caídos, sedimentos, etc.). Al contacto con el terreno natural resistente, si así se programó podrá continuarse el sondeo u ordenar la suspensión de los trabajos.

Una vez que se ha registrado una irregularidad en la exploración será necesario averiguar su causa y, tratándose de una cavidad, deberán estudiarse sus condiciones de accesibilidad, con miras a efectuar su levantamiento por los métodos directos.

Para tener una idea general de las dos técnicas de muestreo más usuales en la zona poniente de la Ciudad de México, se presentan ambas en los párrafos siguientes.

2.4.2.2.1. Penetración estándar.

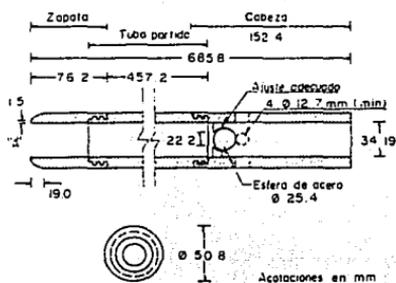
- Objetivos.

El método de exploración denominado prueba de penetración estándar (SPT por sus siglas en inglés), permite estimar la resistencia al esfuerzo cortante del suelo, mediante el número de golpes necesario para hincar el penetrómetro estándar, contando el número de golpes requerido para hincar los 30 cm centrales de cada avance de 60 cm, utilizando un martinete de 63.5 kg que se deja caer desde una altura de 60 cm, y obtener muestras alteradas para identificar los suelos del sitio. Con estas pruebas puede inferirse la estratigrafía del lugar, aprovechando las muestras para determinar sus propiedades índice, como lo son: contenido natural de agua, límites de consistencia, y estimar la resistencia al corte, mediante correlaciones empíricas con el número de golpes.

Esta técnica de exploración es útil en los suelos granulares, en los que el muestreo inalterado es casi imposible; en suelos cohesivos blandos, como los del centro y algunas otras zonas de la Ciudad de México no es recomendable, porque las correlaciones con el número de golpes son poco confiables.

- Equipo.

a) Penetrómetro estándar.- Es un tubo de acero con un extremo afilado, cuyas dimensiones se muestran en la fig. 2.3; el tubo debe estar cortado longitudinalmente para facilitar la observación de la muestra. La válvula en la cabeza del muestreador permite la salida de azolve y evita que la muestra se salga fácilmente del tubo; una válvula que se introduce desde la superficie, una vez hincado el muestreador, se presenta en la fig. 2.4. Este segundo tipo de válvula permite utilizar el penetrómetro como herramienta de lavado para eliminar los azolves lográndose así un muestreo más limpio. Otra alternativa es un tubo cerrado con funda de polietileno, aunque es poco aconsejable, porque no puede observarse la muestra en el campo.



NOTAS

- El tubo partido puede ser de 38.1 mm de diámetro interior para introducir un forro de 1.5 mm de espesor
- Se permite el uso de trampas de paso (caracillos)
- Las aristas en "A" deben estar ligeramente redondeadas

Fig. 2.3 Penetrómetro estándar.

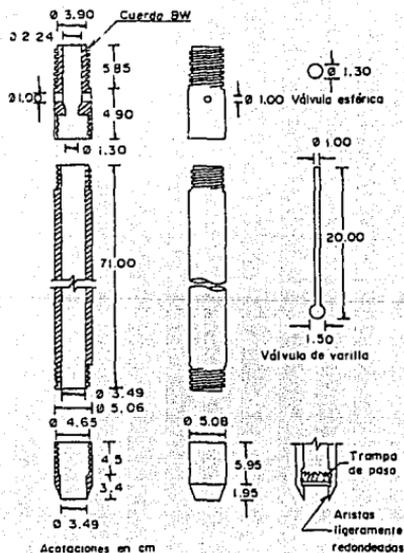


Fig. 2.4 Válvula del muestreador.

b) Columna de barras.- El penetrómetro se coloca en el extremo inferior de una columna de barras de acero de perforación, de diámetro AW o BW. Ambos tipos son equivalentes porque tienen un peso semejante (ver tabla 2.4); sin embargo, son preferibles las BW porque sufren menos pandeo al someterlas a los impactos.

Tabla 2.4 Barras de perforación.

Barra	Díametro ext. (cm)	Díametro int. (cm)	Peso (kg)	Resistencia a la soledad
AW*	4.44	3.09	6.53	Menores de 15 m.
BW	5.40	4.45	6.22	Menores y mayores de 15 m.

* Paredes paralelas.

c) **Martinete golpeador.**- El penetrómetro se hinca con los impactos del martinete de 64 kg y 75 cm de caída (trabajo = 4,800 kg-cm); en la fig. 2.5 se muestran el martinete y la cabeza de golpeo en el arreglo más convencional. Se ha extendido el uso de los llamados martinetes de seguridad (fig. 2.6), que controlan con mayor precisión la altura de caída.

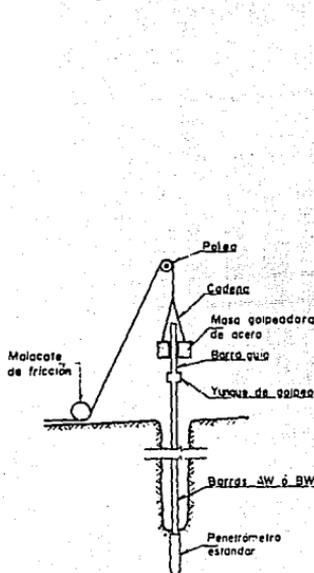


Fig. 2.5 Prueba de penetración estándar.

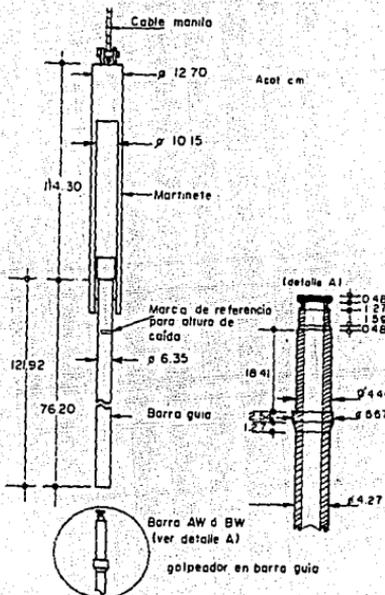


Fig. 2.6 Martinete de seguridad.

d) **Cabeza de gato.** Es un malacate de fricción que levanta el martinete a la altura de calda con un cable de manila de 3/4 pulg.; para sostener el cable, se requiere de un tripié o una torre equipados con una polea.

- Operación del equipo.

La prueba de penetración estándar consiste en hincar el penetrómetro 60 cm con la masa de 64 kg, dejada caer desde 75 cm de altura; durante el hincado se cuenta con el número de golpes que corresponden a cada uno de los tres avances de 15, 30 y 15 cm respectivamente. La resistencia a la penetración estándar se define como el número de golpes, N, para penetrar los 30 cm intermedios (de 15 a 45 cm) los cuales permiten detallar más confiablemente los estratos del sitio; los golpes en los primeros 15 cm se desprecian, porque se consideran no representativos por la alteración inducida a causa de la perforación.

En caso de que el número de golpes llegue a cincuenta en uno de los tres tramos y el muestreador ya no penetre se suspenderá la prueba.

En la operación del martinete debe vigilarse que su altura de caída sea constante y que el cable de manila tenga un máximo de dos vueltas en la cabeza de gato, para lograr el efecto de caída libre sin fricción.

Una vez terminada una prueba se procede a perforar el tramo muestreado, hasta alcanzar la profundidad a la que se realizará la siguiente prueba; el diámetro de perforación más recomendable es 10 cm, en cuanto a la selección de la técnica de perforación más adecuada deberán seguirse algunas recomendaciones que en el desarrollo de este trabajo no se presentarán puesto que no es el objetivo del presente.

Las muestras deben conservarse en frascos o en bolsas herméticas que mantengan constante el contenido de agua; los envases se colocarán en un lugar fresco, protegido de los rayos del sol.

La información de campo debe recopilarse en un registro como el de la fig. 2.7; las notas aclaratorias tendrán que ser claras y breves.

REPORTE DIARIO DE PERFORACION

FECHA _____
 PROYECTO _____
 UBICACION _____
 SONDEO _____
 HORARIO DE TRABAJO _____

N.º	PROFUNDIDAD (M)			RECUPERACION			NA. DE GOLPES EN PRUEBA DE PENETRACION ESTANDAR			HERRAMIENTA EMPLEADA	CLASIFICACION DE CAMPO Y OBSERVACIONES
	INICIO	FIN	AVANCE	M	%	TIPO MUESTRA	15 CM	30 CM	15 CM		
1	0.00	0.10	0.60	0.60	100.00	Aterazada	10	32	4	Penetrómetro estándar	Refrido de labrador y piedra
2	0.60	1.20	0.60	0.35	58.33	Aterazada	10	17	32	Penetrómetro estándar	Arena gris oscura
3	1.20	1.80	0.60	0.35	58.33	Aterazada	17	45	20	Penetrómetro estándar	Limo café claro
4	1.80	2.10	0.30	0.20	66.67	Aterazada	20	50.15	—	Penetrómetro estándar	Limo café claro
---	2.10	2.43	0.30	---	---	---	---	A V A N C E	---	Broca triconica	Avance rotatorio con broca triconica
5	2.43	2.90	0.10	0.07	10.00	Aterazada	50.10	---	---	Penetrómetro estándar	Limo café claro
---	2.90	3.00	0.50	0.00	0.00	---	---	A V A N C E	---	Broca triconica	Avance rotatorio con broca triconica
6	3.00	3.19	0.10	0.05	50.00	Aterazada	50.10	---	---	Penetrómetro estándar	Limo muy arenoso (s. lavado) con gravas
---	3.10	3.60	0.50	0.00	0.00	---	---	A V A N C E	---	Broca triconica	Avance rotatorio con broca triconica
7	3.60	3.65	0.05	0.05	100.00	Aterazada	50.05	---	---	Penetrómetro estándar	Limo arenoso lavado
---	3.65	4.20	0.55	0.00	0.00	---	---	A V A N C E	---	Broca triconica	Avance rotatorio con broca triconica
---	4.20	4.25	0.05	0.00	0.00	---	---	50.05	---	Penetrómetro estándar	Sin recuperacion
---	4.25	4.80	0.55	0.00	0.00	---	---	A V A N C E	---	Broca triconica	Avance rotatorio con broca triconica
---	4.80	4.90	0.10	0.00	0.00	---	---	50.10	---	Penetrómetro estándar	Sin recuperacion
---	4.90	5.40	0.50	0.00	0.00	---	---	A V A N C E	---	Broca triconica	Avance rotatorio con broca triconica
---	5.40	5.43	0.03	0.00	0.00	---	---	50.03	---	Penetrómetro estándar	Sin recuperacion
---	5.43	5.90	0.51	0.00	0.00	---	---	A V A N C E	---	Broca triconica	Avance rotatorio con broca triconica
---	5.90	6.05	0.02	0.00	0.00	---	---	51.02	---	Penetrómetro estándar	Sin recuperacion
---	6.05	6.90	0.60	---	---	---	---	---	---	BARRIL DENISON NAL	Sin recuperacion
8	6.90	7.95	0.35	0.35	100.00	Aterazada	16	50.20	---	Penetrómetro estándar	Arena gruesa poco limosa gris oscura
---	6.95	7.25	0.25	0.00	0.00	---	---	A V A N C E	---	---	Avance por lavado
9	7.25	7.70	0.50	0.30	60.00	Aterazada	17	46	50.05	Penetrómetro estándar	Limo café oscuro con gravas
---	7.70	7.80	0.10	0.00	0.00	---	---	A V A N C E	---	Broca triconica	Avance rotatorio con broca triconica
10	7.80	7.93	0.10	0.10	100.00	Aterazada	50.10	---	---	Penetrómetro estándar	Limo café oscuro con gravas
---	7.90	8.40	0.50	0.30	60.00	---	---	A V A N C E	---	Broca triconica	Avance rotatorio con broca triconica
11	8.40	8.50	0.10	0.10	100.00	Aterazada	50.10	---	---	Penetrómetro estándar	Arena gris claro con gravas
---	8.50	9.30	0.50	0.00	0.00	---	---	A V A N C E	---	Broca triconica	Avance rotatorio con broca triconica
12	9.30	9.30	0.20	0.15	75.00	Aterazada	35	50.05	---	Penetrómetro estándar	Limo café oscuro con gravas
---	9.20	9.60	0.43	0.00	0.00	---	---	A V A N C E	---	Broca triconica	Avance rotatorio con broca triconica
13	9.60	9.65	0.25	0.05	100.00	Aterazada	50.05	---	---	Penetrómetro estándar	Arena gris oscuro con gravas
---	9.65	10.20	0.55	0.00	0.00	---	---	A V A N C E	---	Broca triconica	Avance rotatorio con broca triconica
---	10.20	10.24	0.24	0.00	0.00	---	---	50.24	---	Penetrómetro estándar	Sin recuperacion
---	10.24	10.60	0.50	0.00	0.00	---	---	A V A N C E	---	Broca triconica	Avance rotatorio con broca triconica
---	10.60	11.43	0.50	0.00	0.00	---	---	---	---	BARRIL DENISON NAL	Sin recuperacion
---	11.43	11.43	0.03	0.00	0.00	---	---	50.03	---	Penetrómetro estándar	Sin recuperacion
---	11.43	12.00	0.57	0.00	0.00	---	---	A V A N C E	---	Broca triconica	Avance rotatorio con broca triconica
14	12.00	12.90	0.60	0.30	50.00	Aterazada	---	---	---	BARRIL DENISON NAL	Arena mediana con fragmentos de roca volcanica estibada
15	12.60	14.06	1.43	0.00	0.00	---	---	---	---	BARRIL DENISON NAL	Limo muy compuesto (compagacion) color gris oscuro

Fig. 27 Registro diario de perforación en campo

- Resultados.

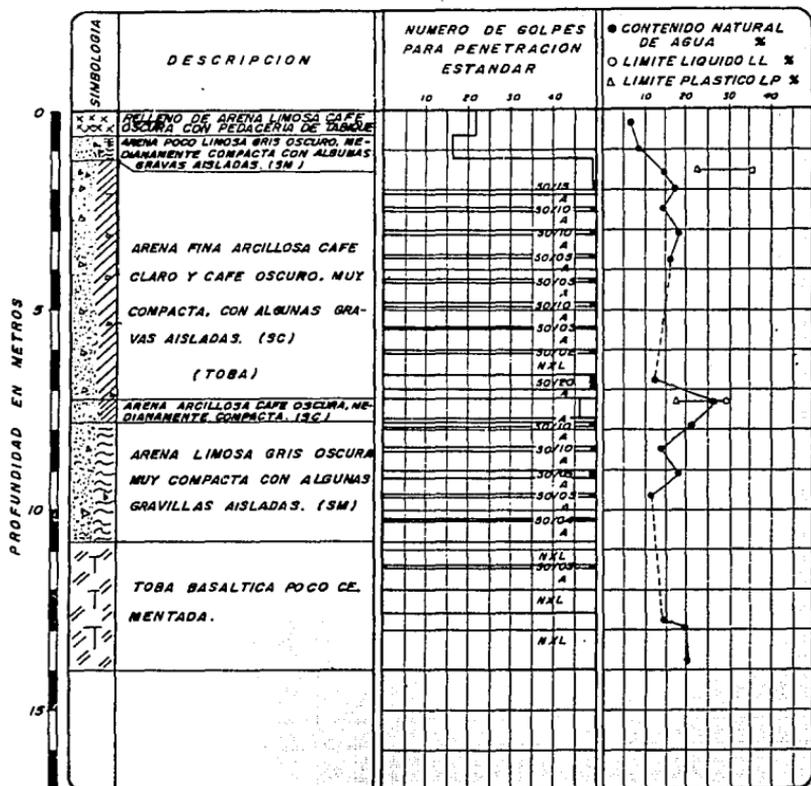
a) Muestras alteradas.- Las muestras rescatadas con el penetrómetro estándar siempre sufren distorsiones geométricas que alteran el acomodo estructural de sus partículas; por ello, sólo pueden servir para identificar los suelos y para las pruebas índice que no requieren especímenes inalterados.

b) Perfil estratigráfico.- La clasificación de campo de los suelos muestreados permite elaborar la primera versión del perfil estratigráfico del sitio, que posteriormente se precisará y corregirá en el laboratorio.

c) Resistencia a la penetración.- Cada una de las pruebas de penetración se representa gráficamente mediante puntos (valores de N), que unidos por líneas definen la variación de la resistencia a la penetración estándar con la profundidad (fig. 2.8).

d) Resultados típicos.- En la fig. 2.8 se presenta un buen ejemplo de congruencia de la prueba de penetración estándar, SPT, con las condiciones estratigráficas del sitio investigado.

La interpretación de la prueba de penetración estándar se hace siempre a partir de relaciones empíricas; es conveniente aclarar que ninguna de ellas ha sido comprobada para los suelos de la Ciudad de México y que para los suelos más blandos del lago, en los que el penetrómetro se hincan únicamente por el peso de las barras y el martillo, no podrá establecerse ninguna correlación confiable debido a la falta de sensibilidad de esta prueba ante la baja resistencia al corte de la arcilla ($N = 0$).



SINBOLOGIA



— MAS DE 50 GOLPES

T.S. TUBO SHELBY

T.D. TUBO DENISON

NXL. BARRIL

A AVANCE CON BROCA TRICONICA DE 2 1/8"

Fig. 2.8 Registro del sondeo de penetración estándar (SPT).

Por lo anterior, las correlaciones que se describen a continuación deben aplicarse con las debidas reservas, ya que se desconoce su orden de precisión y tampoco se sabe la tendencia del signo de cada correlación; por ejemplo podría subestimarse sistemáticamente la resistencia.

- a) **Correlación de N en suelos cohesivos.**- El número de golpes, N, de la prueba de penetración estándar, SPT, puede interpretarse con la ayuda de la tabla 2.5 o de la fig. 2.9; con alguno de estos auxilios se deduce el valor de la resistencia a la compresión simple (q_u) y el correspondiente a la resistencia al corte ($c = q_u/2$).

Tabla 2.5 Correlación entre N, q_u y consistencia relativa de suelos cohesivos.

Consistencia:	Muy blanda:	Blanda	Medio	Dura	Muy dura	Durísima
N	< 2	2 - 4	4 - 8	8 - 15	15 - 30	> 30
q_u	< 0.25	0.25 - 0.50	0.50 - 1.0	1.0 - 2.0	2.0 - 4.0	> 4.0

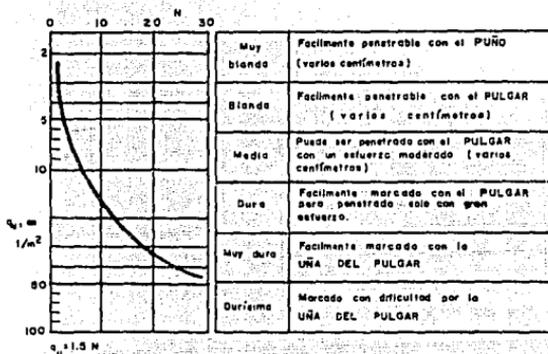


Fig. 2.9 Correlación entre N, q_u y la consistencia relativa.

- b) **Correlaciones de N en suelos granulares.**- Usualmente se estima la compacidad relativa auxiliándose en la tabla 2.6.

Tabla 2.6 Correlación entre compacidad relativa de arenas y número de golpes obtenido en pruebas de penetración estándar.

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

- Comentarios.

La prueba de penetración estándar, SPT, es aplicable sólo en la etapa de exploración del subsuelo; la información que proporciona carece de la confiabilidad necesaria para definir con precisión los parámetros de resistencia de los suelos; por tanto no debe aplicarse para el diseño geotécnico definitivo.

En particular, la penetración estándar constituye un procedimiento relativamente económico para investigar la presencia de mantos de materiales comúnmente objeto de explotación. Además, la utilidad de la resistencia a la penetración para detectar rellenos superficiales y minas derrumbadas y/o rellenadas se ha comprobado en algunos casos, pues es común que estos derrumbes o rellenos se encuentren en estado suelto, disminuyendo notablemente su resistencia con relación a la de los materiales naturales intactos, que en general es alta.

2.4.2.2.2. Barril Denison.

- Objetivos.

Con el muestreador de barril Denison, que opera a rotación y presión, se obtienen especímenes de arcillas duras, limos compactos y limos cementados con pocas gravas, localizados abajo del nivel freático; las muestras siempre presentan cierto grado de alteración. Cuando se muestrea en estos suelos arriba del nivel freático, las muestras se contaminan con el agua o lodo de perforación, por lo cual su aplicación se condiciona al empleo de aire como fluido de perforación.

- Descripción del muestreador.

El muestreador tipo Denison consiste en dos tubos concéntricos; uno interior, que penetra en el suelo a presión, y rescata la muestra, mientras que el exterior, con la broca en su extremo gira y corta el suelo circundante. Para operar este muestreador se requiere fluido de perforación (agua, lodo o aire) que se hace circular entre ambos tubos.

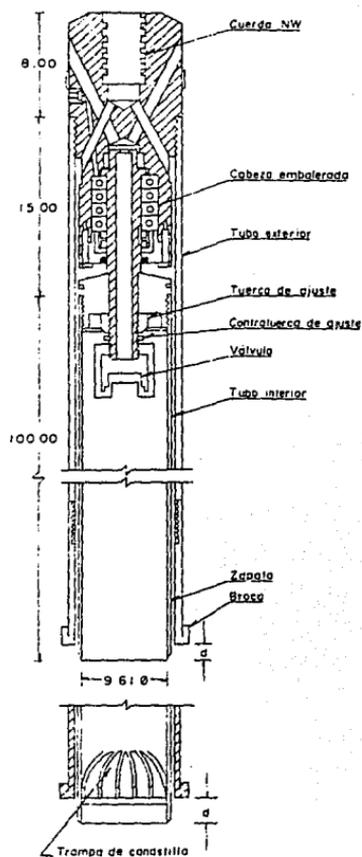
En la fig. 2.10 se presenta el diseño actualizado de este muestreador; se observa como los tubos concéntricos se acoplan a la cabeza con baleros axiales, que sirve de unión con la columna de barras de perforación y permite que el tubo interior se hinque a presión en el suelo, sin inducir esfuerzos de torsión a la muestra. La cabeza del muestreador tiene una tuerca de ajuste que controla la posición relativa entre ambos tubos; así, durante el muestreo, el tubo interior penetra en el suelo una distancia "d" antes de la broca (fig. 2.11), para proteger a la muestra de la erosión y contaminación que le puede ocasionar el fluido de perforación. La broca de corte es una pieza de acero con pastillas de carburo de tungsteno que protegen las zonas de mayor desgaste; en la fig. 2.12 se muestran las dos brocas tipo más usuales.

Las dimensiones del muestreador Denison, que permiten obtener muestras de 7.5 y 10 cm de diámetro nominal, se anotan en la tabla 2.7; el diámetro admisible de muestreos es de 10 cm.

Tabla 2.7 Dimensiones del muestreador Denison, en cm.

Diámetro nominal	Tubo Interior				Tubo Exterior				Broca
	De	Di	Di	La	De	Di	Di	La	
7.5	7.62	7.22	7.17	75	8.52	7.92	90	60	BW
10.0	10.16	9.76	9.71	90	11.16	10.46	105	75	NW

Para el muestreo de materiales granulares conviene adaptarle una trampa de canastilla, formada por lengüetas de lámina de acero flexible (fig. 2.10).



Ajuste d , entre broca
y tubo interior

Tipo de suelo	d , en cm
Blanda	2
Dura	0.5
Muy dura	0 o el menor

Fig. 2.10 Muestreador Denison.

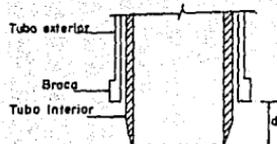


Fig. 2.11 Ajuste del muestreador Denison.

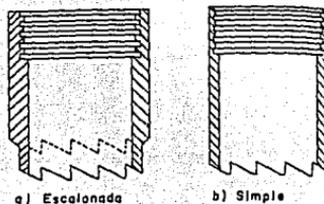


Fig. 2.12 Tipos de broca Denison.

- Operación del equipo.

Antes de introducir el muestreador al sondeo se debe ajustar la distancia "d", entre el tubo interior y la broca (fig. 2.11), de acuerdo con el material que se va a muestrear; también se necesita verificar que la cabeza esté limpia, engrasados los baleros y que la válvula opere correctamente. A continuación se baja el muestreador al fondo de la perforación y se hinca la profundidad "d", para evitar que el tubo interior gire al iniciar la rotación del tubo exterior. Durante el muestreo, la máquina perforadora transmite, a través de la columna de barras, rotación y fuerza vertical; la primera varía entre 50 rpm para materiales blandos y 200 rpm para los duros. En cuanto a la fuerza vertical puede ser hasta de 1 tonelada.

Una vez que se ha penetrado la longitud prevista o que el muestreador no pueda avanzar, se suspende la rotación y la fuerza axial, dejándola reposar tres minutos a fin de permitir que la muestra se expanda; después se gira para romper el espécimen por la base y posteriormente se extrae el muestreador.

La extracción del material que corta la broca, así como el enfriamiento de la misma se hace con un fluido de perforación que circula por el espacio anular que dejan los dos tubos. En muestreos arriba del nivel freático se debe utilizar aire; podría ser admisible emplear lodo, condicionando a comprobar que la contaminación que induce a la muestra sea tolerable. En muestreos abajo del nivel freático es factible utilizar agua o lodo. La presión de operación del fluido de perforación debe ser la mínima necesaria, para mantener limpia la perforación.

- Comentarios.

El empleo de este muestreador con lodo de perforación generalmente induce contaminación en las arcillas que se localizan abajo del nivel freático, así como el lavado de lentes de arena típicas del subsuelo de la Ciudad de México; por ello generalmente se obtienen mejores muestras con el tubo dentado de rotación. El barril Denison es el mejor muestreador para las tobas duras, cuidando de utilizar aire como fluido de perforación, cuando se muestrea arriba del nivel freático.

Por su parte, el muestreo inalterado puede permitir, a través de la observación de la estructura de las muestras, la diferenciación entre materiales intactos y derrumbes o sedimentos en cavidades. Es obvio que tratándose de materiales del primer tipo, podrán determinarse además sus propiedades índice o mecánicas.

2.4.3. Métodos Indirectos.

Se consideran así a algunos métodos geofísicos que pueden ser de utilidad en la detección de cavidades subterráneas, entre ellos se pueden mencionar a: la magnetometría, los sísmicos (reflexión y refracción), la gravimetría y los métodos eléctricos.

Estos métodos son apropiados para inferir la existencia de anomalías en el subsuelo, representadas por cavidades tanto de origen artificial como natural. Por lo tanto en cualquier estudio de investigación de zonas minadas, puede resultar conveniente utilizarlos. Los resultados que se obtengan a través de estudios geofísicos del sitio, deben comprobarse o complementarse con auxilio de los métodos semidirectos y finalmente trabajar en la inspección directa de las anomalías detectadas. Por otra parte, los métodos geofísicos permiten conocer la estructura geológica del subsuelo, con ellos es posible obtener información sobre los espesores de cada una de las capas de suelo así como definir la calidad de rellenos superficiales, que pueden ser producto de la demolición de bóvedas de minas o bien ocultar sus bocas. La aplicación de algún método geofísico en la investigación de cavidades en la zona poniente y en general en el D.F. ha resultado costosa y en ocasiones poco utilizada. Las áreas minadas presentan condiciones que afectan los resultados de los diversos métodos y los hacen de difícil interpretación, además se tiene muy poca experiencia en este campo. Basado en estos antecedentes y a resultados de la aplicación de alguno (s) de ellos en la zona poniente de la Ciudad de México, a continuación se comentarán algunas de sus limitantes en la investigación de cavernas, aunque por separado se explicará sólo el principio básico del método de resistividad eléctrica por ser el más utilizado y el que ofrece resultados relativamente más confiables comparado con otros métodos.

- Métodos magnéticos.

Sus resultados son muy dudosos, ya que las fluctuaciones observadas pueden interpretarse de muchas maneras (variaciones de susceptibilidad magnética entre estratos, variaciones del nivel freático, etc.) y no existe una relación casual con las minas.

- Métodos gravimétricos.

En el caso de cavidades en tobas volcánicas, como sucede en la zona poniente del D.F., la utilidad del método es poco aconsejable debido a que el contraste de densidades es mínimo y las cavernas son irregulares y más bien pequeñas. Además, muchas veces existen capas superficiales duras, de espesor variable, que no permiten la detección de anomalías más profundas.

- Microgravimetría.

Su uso en la detección de cavidades en tobas y cenizas volcánicas es poco eficaz, ya que la necesidad de hacer un levantamiento detallado de todos los obstáculos e irregularidades del terreno lo hace económicamente prohibitivo en la mayoría de los casos.

- Métodos sísmicos.

El método sísmico por refracción no es adecuado para detectar cavidades ocultas de cualquier tamaño; la oquedad subterránea no puede compararse con la superficie continua que limita dos medios de características mecánicas diferentes.

Una mina es más equiparable a una variación de compacidad dentro de un mismo medio, que se refleja en un ligero y local retraso en el tiempo de propagación de las ondas sísmicas.

El empleo del método sísmico de reflexión a poca profundidad está poco desarrollado para resolver problemas de Ingeniería Civil. Tratándose de túneles de minas, estos no representan superficies en las cuales se puedan reflejar las ondas sísmicas emitidas desde la superficie, las cuales atraviesan las oquedades sin alterarse prácticamente en su trayecto.

- Métodos eléctricos.

Dentro de las técnicas que ofrecen los métodos eléctricos y que interesan a la Ingeniería Civil, se reducen prácticamente a dos: el método de caídas de potencial y el de medición de resistividades eléctricas. Sin embargo, en el caso particular del poniente de la Ciudad de México, los estudios se realizan en áreas urbanas donde existen líneas de alta tensión o ductos enterrados a poca profundidad (obras de drenaje, agua potable, etc.) y la calidad de la información es frecuentemente alterada.

2.4.3.1. Método de resistividad eléctrica.

A continuación se describe ampliamente este método por la experiencia aportada a la Geotécnica y por su constante aplicación para detectar cavidades en el poniente de la Ciudad de México y en otros sitios de interés. También cabe recordar que actualmente existe información de estudios geofísicos realizados en el D.F. para la detección de cavidades subterráneas de origen artificial, de todos ellos se desprende que más del 50% han reportado la existencia de minas subterráneas, corroborándolas mediante sondeos de tipo rotatorio y lumbreras para proceder posteriormente a su levantamiento topográfico o a otro tipo de actividades. Cabe señalar que no es el único método geofísico existente para lograr la detección de minas subterráneas artificiales; la estrategia para lograr mejores resultados, será utilizar aquel método cuya tecnología y procedimiento de investigación se adapte mejor a las características propias del sitio por estudiar sin menospreciar los costos y el objetivo particular de cada estudio.

- Objetivos.

Deducir las posibles características estratigráficas de un sitio y la posición del nivel freático, a partir de la interpretación de las resistividades medias de los suelos, además de la delimitación de las anomalías provocadas por cuerpos extraños existentes en el medio medido (cavidades naturales y/o cavidades artificiales).

- Equipo de medición.

Esta compuesto por una fuente de poder, un voltímetro, un amperímetro, cuatro electrodos y cables con el voltímetro y el amperímetro en una unidad compacta. En la tabla 2.8 se presentan las características de los equipos portátiles.

Los electrodos son varillas usualmente de broca de 2 cm de diámetro y 50 cm de longitud, con un extremo en punta para hincarse en el terreno. Los cables de conexión son de cobre con forro de neopreno.

Tabla 2.8 Características de algunos equipos portátiles usados en el Método de Resistividad Eléctrica.

Fuente de poder	Capacidad (m)	Intensidad de corriente (mA)	Intervalo de mediciones	Peso total (kg)
Baterías recargables	30	20	0.1 a 1000 Ω	20
	20	50	0.1 a 1000 Ω	15
	300	100 a 150	0.002 a 10 Ω	80
	200	0 a 100	0.0002 a 100 Ω	75

(mA) *.- Milliampères.

- Procedimiento de la prueba.

Para la exploración geoelectrica se han desarrollado diversos métodos; el denominado arreglo de Wenner es el más utilizado por su simplicidad. Tiene dos técnicas de operación: sondeo eléctrico, que estudia la estratigrafía según una vertical, y rastreo eléctrico, que lo hace conforme una horizontal a cierta profundidad; combinando ambas técnicas se puede tener idea clara de las condiciones del subsuelo en el sitio.

El campo eléctrico se induce al terreno con dos electrodos, denominados de corriente, que se hincan y conectan mediante el cable a la fuente de poder y el amperímetro; entre estos electrodos se hincan dos de potencial conectados al voltímetro. Con el amperímetro se mide la intensidad de la corriente inducida al terreno y con el voltímetro la diferencia de potencial entre los electrodos centrales.

Las distancias entre los electrodos puede variarse dando lugar a diferentes arreglos; en el más usual, conocido como Wenner, los electrodos se instalan alineados con separación equidistante "h"; con este arreglo la medición hecha es representativa del material a la profundidad "h".

El sondeo eléctrico se realiza manteniendo el centro del arreglo Wenner fijo e incrementando la separación de "h"; en cambio en el rastreo eléctrico únicamente se cambia de lugar el arreglo (de igual "h") sobre una retícula trazada en la superficie. Se combinan el sondeo y el rastreo para definir las condiciones geológicas del lugar. Ambas técnicas deben iniciarse determinando la resistividad del estrato más superficial, colocando los electrodos con una separación menor que el espesor del primer estrato. El arreglo de los electrodos se muestra en la figura 2.13.

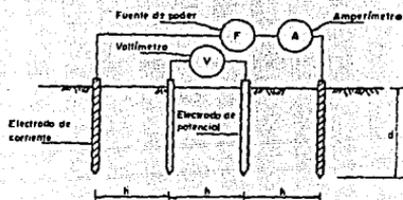


Fig. 2.13 Arreglo Wenner.

- Resultados.

Los datos de resistividad pueden interpretarse cualitativamente construyendo diagramas de isoresistividades aparentes (fig. 2.14).

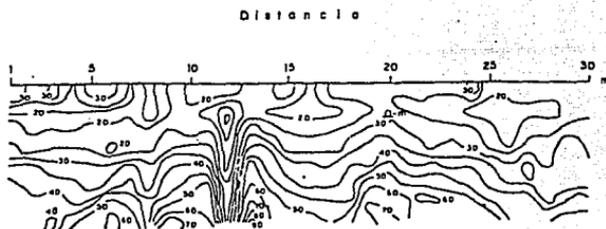


Fig. 2.14 Diagrama representando curvas de isoresistividades.

- Interpretación de los resultados.

a) Resistividad aparente.

El arreglo Wenner genera un campo eléctrico con profundidad "h", ancho 0.75 h y longitud 4.5 h. De la prueba se obtiene la diferencia de potencial V y la intensidad de la corriente I; la resistividad aparente se obtiene mediante:

$$\rho_a = 2 \pi h \frac{V}{I}$$

donde:

ρ_a = Resistividad aparente a la profundidad h, en ohms-m

V = Diferencia de potencial, en volts.

I = Intensidad de la corriente, en amperes.

Quando se usan equipos portátiles que miden la resistencia, se puede sustituir la relación V/I por R, resistencia en ohms.

b) Estratigrafía.

Sondeo eléctrico. - La interpretación del sondeo eléctrico se realiza con el procedimiento de cálculo de Hummer quien dedujo la expresión de la resistividad aparente para el caso de una capa de resistividad ρ_2 a sobreyaciendo un estrato infinito de resistividad ρ_1 .

$$\rho_a = \rho_1 + 4\rho_1 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k^n}{\sqrt{1 + (2n\pi l/h)^2}} - \frac{k^n}{\sqrt{4 + (2n\pi l/h)^2}}$$

donde:

$n = 1, 2, 3, \dots, \infty$

H = Espesor de la capa, en m.

h = Equidistancia entre electrodos, en m.

$$k = \frac{\rho_1 \cdot \rho_2}{\rho_1 + \rho_2}$$

Money y Wetzel obtuvieron la familia de curvas derivadas de la ecuación anterior para simplificar el cálculo de ρ_2 y H (fig. 2.15).

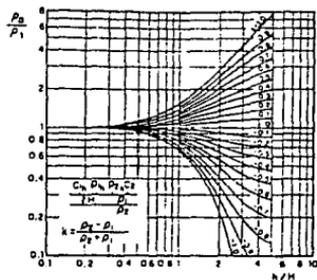


Fig. 2.15 Curvas de resistividad aparente para el caso de una capa mediante el arreglo Wenner.

La forma de utilizar esta gráfica es la siguiente: para determinar la resistividad ρ_1 del estrato superficial se utiliza alguna medición realizada con una equidistancia h , menor que el espesor de la capa, aplicando la fórmula de la resistividad aparente; cuando se tenga duda de este valor se recomienda hacer una gráfica de variación de la equidistancia h con la resistividad aparente; extrapolando se puede determinar ρ_1 como el valor de ρ_a cuando h tiende a cero. Conocidas ρ_1 y ρ_2 para un valor de h se traza en la gráfica una horizontal para ρ_a/ρ_1 y se obtiene una serie de valores de k y h/H ; de este conjunto de valores se dibuja la variación de K vs H , ya que h es constante para cada medición. Se dibujan las curvas de k vs H para los diferentes valores de h ; si las curvas se cruzan en un punto (H, k) (fig. 2.16), se tiene el caso de una capa sobreyaciendo un estrato infinito. En caso de no cruzarse en un punto, se compara la curva ρ_a vs h con curvas teóricas para diferentes configuraciones de estratificación, que han sido preparadas por investigadores como Mooney y Wetzel.

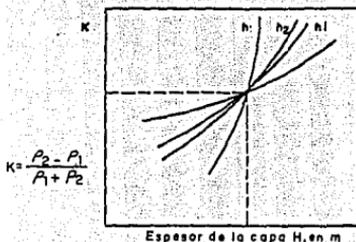


Fig. 2.16 Gráfica H vs k para el caso de una capa.

En general, el número de capas involucradas en una prueba se puede detectar en la curva ρ_a vs h mediante el número de cambios de pendiente.

Rastreo eléctrico. - Para interpretar la prueba se hace una gráfica de distancias, de origen arbitrario al centro del arreglo, contra resistividades aparentes; las resistividades reales en cada zona a la profundidad h serán las que estén localizadas fuera de las zonas de transición (fig. 2.17).

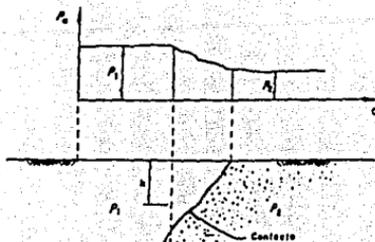


Fig. 2.17 Gráfica típica de resistividades para el caso de un contacto.

c) Clasificación de suelos.

La clasificación tentativa de los materiales se hace por comparación de la resistividad eléctrica con valores típicos, como los de la tabla 2.9.

La posición del nivel freático se detecta fácilmente en la sección de isoresistividades.

Suelos finos	$1 \text{ a } 10 \times 10^4$
Arenas	$2.2 \text{ a } 4 \times 10^2$
Depósito glacial	5×10^2

d) Anomalías resistivas.

Desde el punto de vista eléctrico, cualquier oquedad o ausencia de material en el subsuelo se considera como una masa resistente, por estar en general llena de aire, cuya resistencia es mucho mayor que la de los materiales que lo rodean.

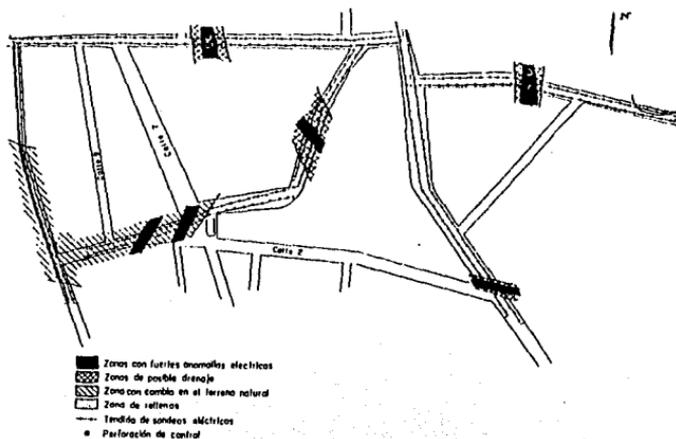
En el caso de existir en el subsuelo una masa más resistente que el medio que la rodea, las líneas de resistividad, paralelas en terreno homogéneo tienen tendencia a circundarla. De las anomalías resistivas se tiene la posibilidad de delimitar, tanto en planta como en perfil, el área que ocupa la oquedad, o por lo menos se pueden definir sus ejes principales.

Por medio de perfiles se investiga el área con problemas y se trazan los diagramas (secciones) de isorresistividades aparentes, que darán, además de la estructura geológica, la delimitación de las anomalías provocadas por cuerpos extraños existentes en el medio medido. Una cavidad subterránea se caracteriza siempre por un aumento del valor de las resistividades, en forma creciente y positiva. En cambio, una anomalía de esta forma en el valor de las resistividades no siempre es causada por una oquedad, ya que puede deberse a una intrusión geológica de forma lenticular o filónica. La única diferencia posible para identificar una anomalía por oquedades, es el mayor valor de las resistividades debido a un efecto de drenaje del medio que rodea la cavidad oculta, mucho más intenso que en el caso de una lente o filón. Como ejemplo se muestra en el Anexo 2 un estudio de prospección geofísica para detectar cavidades, realizado fuera de la zona de estudio, por lo cual solo se debe considerar como un antecedente para interpretar los resultados que se obtienen de la aplicación de un método geofísico.

2.4.3.1.1 Informe de un estudio geoelectrico en la zona de estudio.

De algunos estudios geoelectricos para detectar cavidades, se seleccionó el realizado en marzo de 1974 correspondiente a las colonias Butacas, Primera y Segunda Victoria. En el estudio se describe lo concerniente a: propósito del estudio, trabajos realizados, resultados y un breve reporte de la exploración del subsuelo mediante perforaciones de tipo rotatorio. El presente informe no incluye los diagramas de isorresistividades, solo se enfoca a una anomalía provocada probablemente por una cavidad subterránea de tipo artificial. Solo persiguiendo fines ilustrativos y para una mejor comprensión del mismo, se muestra dicho informe para analizar tanto la utilidad del método de resistividad eléctrica en el campo de la mecánica de suelos, así como sus alcances ante esta problemática.

- Croquis de localización.



- Propósito del estudio geofísico.

Se realizó un estudio geofísico por el método eléctrico resistivo, orientado a definir la posible existencia de oquedades artificiales o chimeneas en proceso de desprendimiento, que pudieran producir hundimientos del terreno con riesgo para la futura urbanización.

- Descripción de los trabajos realizados.

Para llevar a cabo esta investigación geofísica, se empleó el método eléctrico resistivo, con el tipo de arreglo de electrodos B63. Este tipo de arreglo consiste en colocar una serie de 7 electrodos de toma de tensión y medir por cada intervalo una diferencia de potencial a partir de 2 electrodos de corriente. De esta manera se establece una verdadera red de puntos de control con un espaciamiento del orden de 2 a 4 m entre cada determinación de resistividad.

El aparato de mediciones empleado en este estudio fue del tipo electrómetro, a fin de no producir perturbaciones en el campo eléctrico medido.

El estudio geofísico se llevó a cabo en las calles 1, 2, 3, 5, 8 y 11 por medio de dos perfiles paralelos (a 3 m aproximadamente) y tendidos consecutivos.

Cada tendido ocupó una longitud de 24 m con 7 electrodos de broca (tensión) fijos a cada 4 m y 2 electrodos de hierro (intensidad) de los cuales uno se ubicó en el infinito y el otro avanzaba 4 m en su desplazamiento.

Este sistema permite medir resistividades aparentes cada 2 m en longitud y cada 4 m en profundidad, hasta una profundidad de 22 m.

Para 720 m de estudio se realizaron más de 4 200 determinaciones de resistividad en valor aparente.

- Resultados.

a) Calle 1.

Se detectó una anomalía bajo los tendidos T8, T9 y sus homólogos T8' y T9', donde se aprecia una elevación brusca de las resistividades, en un espacio reducido pasan de 20 ohm-m a más de 400 en unos 12 m. Lo más probable es que esta anomalía del campo eléctrico provenga de una excavación artificial.

b) Calle 3.

Las medidas de resistividades realizadas no manifiestan tener variaciones de importancia. Se detectó un relleno donde se observa una variación brusca de resistividades de 30 ohm-m a más de 100 ohm-m en un espacio de tan solo 4 m.

c) Calle 8.

Las medidas obtenidas no indican una variación fuera de lo normal.

d) Calle 11.

Las medidas resistivas delimitan claramente dos zonas, la primera con valores ohmícos idénticos y la segunda de mayor resistividad global; estas medidas no parecen poner en evidencia anomalías sospechosas.

e) Calles 2 y 5.

Las medidas geofísicas realizadas no ponen de manifiesto anomalías sospechosas.

- Conclusiones.

Existen varios sitios cuyas anomalías resistivas pueden ser consecuencia de oquedades artificiales.

Con objeto de verificar lo anterior se recomendó llevar a cabo perforaciones mecánicas en los lugares donde se ubicaron anomalías probables de excavaciones artificiales.

- Reporte de la exploración del subsuelo (sondeos de tipo mecánico).

Se realizó con objeto de verificar la existencia o no de posibles cavidades detectadas por anomalías en el estudio geoelectrico realizado con anterioridad.

Se llevaron a cabo 4 perforaciones con broca tricónica de 3 pulgadas de diámetro, como herramienta de avance, hasta una profundidad de 15 m cada una, los resultados de tal exploración fueron los siguientes:

SONDEO	DESCRIPCION
S - 1	No se encontraron cavidades.
S - 2	No se encontraron cavidades, el agua se perdió a partir de 1.20 m.
S - 3	Cavidad entre 2.10 y 3.40 m de profundidad.
S - 4	A 0.50 m de profundidad se perdió el agua. De 3.90 a 5.80 m existe una cavidad.

CAPITULO 3

PROBLEMAS DE ESTABILIDAD EN TERRENOS MINADOS

3.1 Alcances.

En este capítulo se presentarán algunas consideraciones de carácter teórico y empírico concernientes a la estabilidad de las excavaciones subterráneas de tipo artificial, tanto para galerías aisladas como para un grupo de galerías, basadas principalmente en la teoría de Terzaghi para túneles y en las consideraciones de otros autores en el análisis de macizos rocosos; ambas alternativas son las que se seleccionaron para entender la problemática que plantea la estabilidad en zonas minadas. Por lo tanto, el objetivo que se persigue consiste simplemente en ampliar el criterio del ingeniero, sin pretender resolver numéricamente un problema complejo, en el que intervienen por una parte, un gran número de variables, dificultades de evaluación, y por otra la confiabilidad de los datos.

Se presentarán aspectos relevantes como los factores que afectan la estabilidad, alteraciones provocadas por la explotación subterránea de materiales, colapsos, teorías para conocer la distribución y evaluación de esfuerzos en una excavación aislada y en excavaciones múltiples (grupo de galerías), la migración de cavidades y finalmente la afectación de los sismos en las oquedades.

3.2. Factores que afectan la estabilidad.

Los factores que influyen en la estabilidad de terrenos minados pueden clasificarse en tres:

- a) Geométricos, tales como dimensiones, profundidad, altura libre y número de niveles de cavidades.
- b) Propiedades del terreno, en particular las de resistencia y deformabilidad de los materiales que constituyen las bóvedas y pilares.
- c) Agentes externos: sobrecarga, sismos, erosión, intemperismo y algunos otros.

Para el análisis y la elección de la mejor solución al problema, es indispensable conocer los tres factores anteriores. La profundidad de tal conocimiento esta limitada por las condiciones de cada caso particular.

Los estudios en zonas minadas deben tener un alcance tal que no solo confirmen con certeza la existencia o no de cavidades, sino que proporcionen el suficiente detalle geométrico de ellas bajo el área investigada.

La mayoría de los materiales que predominan en las zonas minadas del poniente del D.F. son deleznable y su resistencia no garantiza la estabilidad de las bóvedas, en particular si éstas son de dimensiones amplias y de espesor reducido.

Así también, los estratos de suelo que limitan a las cavidades, las paredes de las mismas y los pilares que se dejan entre éstas, están constituidos comúnmente por partículas granulares de interés económico para la construcción, tales como arena y materiales pumíticos ligeros; es por ello que su resistencia no garantiza su funcionamiento como elementos de soporte de las bóvedas, sobre todo si son de dimensiones reducidas.

Los materiales expuestos al medio ambiente y a la acción de otros agentes, experimentan alteraciones en deterioro de sus propiedades mecánicas, además de modificar en forma desfavorable las dimensiones originales de las cavidades, debido al desprendimiento constante del material de las paredes, techo, piso y pilares que rodean a las mismas.

Por tanto, en todo análisis de estabilidad, se debe considerar la acción de todos los factores ya señalados y de algunos otros cuya evaluación es difícil, como en el caso del intemperismo.

Ante esta situación, todo problema por resolver debe apoyarse tanto en mediciones como observaciones y en la experiencia que reporten diversos casos particulares.

3.3 Alteraciones debidas a la explotación.

Los movimientos del terreno son una consecuencia inevitable de la explotación subterránea.

Con la extracción de materiales del subsuelo, las formaciones que sobreyacen a las cavidades se deforman provocando movimientos en la superficie del terreno tales como:

- a) asentamiento o desplazamiento vertical.
- b) inclinación o volteo producidos por asentamientos diferenciales,
- c) curvatura o inclinación diferencial,
- d) desplazamiento horizontal y
- e) deformaciones por compresión o tensión.

Estos movimientos se ilustran esquemáticamente en la fig. 3.1. Puede notarse que el área afectada en la superficie es mayor a la que circunscribe al área explotada, dando lugar al concepto de "ángulo de influencia" tal y como se muestra en la figura.

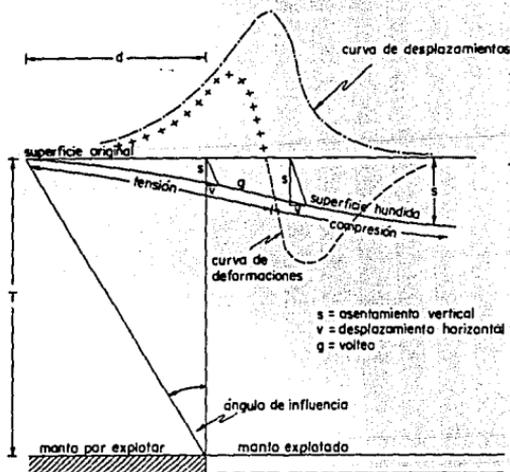


Fig. 3.1 Movimientos del terreno inducidos por la explotación subterránea.

En el caso de las zonas minadas de la Cd. de México, no existen mediciones a partir de las cuales se pueda determinar el valor del ángulo de influencia; sin embargo en Gran Bretaña se ha determinado que su valor medio es de 35° . Esto significa que los movimientos se desarrollan hasta una distancia " d " igual a $0.7 T$, donde T es el techo o espesor de la bóveda; para fines prácticos puede suponerse que " d " es la mitad de la profundidad, a partir de la cual los daños son despreciables.

El concepto de "área crítica" originado en Alemania, conduce a que los trabajos de minería realizados fuera de ella no influyen en el punto "P" (fig. 3.2). El área crítica de forma aproximadamente circular, se define como la base imaginaria que proyecta un cono bajo el punto "P".

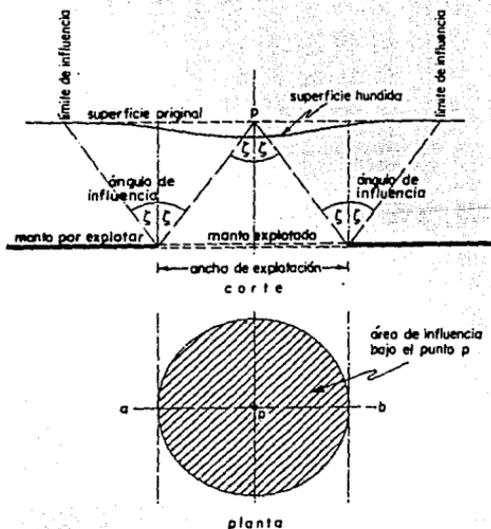


Fig. 3.2 Área de influencia en trabajos de minería.

El diámetro de la base, según el caso antes citado es igual a 1.4 veces el techo de la mina. Si la explotación se realiza abarcando toda el área crítica, en el punto "P" se producirán los máximos asentamientos; resultando menores a medida que la fracción explotada de esa área sea menor.

Dependiendo de la anchura del área explotada se establecen tres condiciones en cuanto a la magnitud de los asentamientos en la superficie.

- a) Subcrítica, cuando el ancho de la explotación W_1 es menor que el diámetro del área crítica.
- b) Crítica, cuando el ancho de la explotación W_2 es igual al diámetro del área crítica.
- c) Supercrítica, cuando el ancho de la explotación W_3 es mayor que el diámetro del área crítica, según se ilustra en la fig. 3.3.

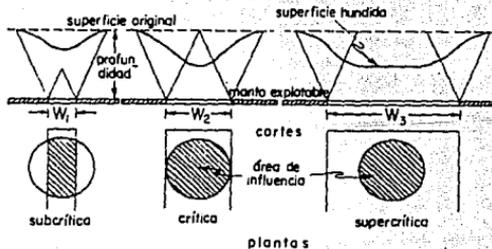
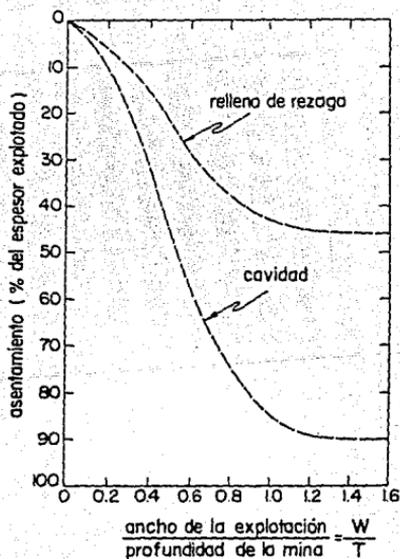


Fig. 3.3 Formas del hundimiento en la superficie al variar el ancho de explotación.

Para el caso de minas de carbón de Gran Bretaña, se obtuvo la gráfica 3.1 para estimar el asentamiento como un porcentaje del espesor explotado considerando para ello la relación entre el ancho de la explotación W y la profundidad o techo de la mina T .

Es importante señalar que dicho criterio solo es aplicable a las minas de carbón de ese país, sin embargo, las variables geométricas consideradas para el análisis tienen una influencia directa en los asentamientos producidos por este problema. De la gráfica se deduce que los asentamientos serán mayores a medida que la relación anchura-techo aumenta en valor, es decir, cuando la mina se acerque a la superficie y cuando el área explotada aumente.



Gráfica 3.1 Relación de asentamiento a ancho : profundidad.

Para el caso de las minas de la Ciudad de México que se explotaron hace ya algunas décadas, es probable que los movimientos hayan ocurrido en su totalidad; esto no puede afirmarse con certeza debido a que no se cuenta con datos de mediciones. En otros países, las mediciones indican que los asentamientos son inmediatos en un 95% de los casos analizados y tienen lugar durante la explotación, y la fracción restante ocurre a largo plazo (asentamiento residual).

Por lo tanto, y a reserva de cada caso particular puede ser probable que todas las obras de edificación ejecutadas después de cualquier explotación en zonas minadas, no estén afectadas, al menos en forma perceptible, por los asentamientos producidos por la extracción de materiales.

3.4. Colapsos.

Es indudable que los peligros en zonas minadas del poniente de la ciudad de México están representados por:

- a) Falla de bóvedas, ya sea por incremento de esfuerzos provocados por sobrecargas en la superficie y fuerzas accidentales, o por la disminución o pérdida de la resistencia al corte de la sección de la bóveda, ocasionada por la acción de otros agentes externos.
- b) Falla de pilares por las causas mencionadas en a).
- c) Migración de cavidades hacia la superficie del terreno.

El riesgo de estas fallas es alto dada la poca profundidad de la mayoría de las minas y su proceso de alteración que reduce notablemente la resistencia de los materiales que las constituyen. Si la acción de los agentes externos es constante, el riesgo aumenta con el transcurso del tiempo. Esta tendencia se ha observado en algunas zonas minadas en el poniente del D.F.

3.5 Cavidades aisladas.

Para fines del presente trabajo se consideran como cavidades aisladas, a aquéllas que se encuentran separadas de otras la distancia suficiente para que no exista interacción apreciable de esfuerzos; resulta razonable considerar que la separación mínima no rebase la cantidad de cinco veces la anchura media de las galerías, de centro a centro.

En general, las galerías aisladas se pueden encontrar en accesos a zonas potencialmente mineras, o bien dentro de éstas cuando se buscan áreas de materiales de mejor calidad para ser explotadas, o cuando el material explotable se aloja en franjas de anchura y espesor reducido.

3.5.1 Distribución de esfuerzos alrededor de excavaciones subterráneas unitarias.

La distribución de esfuerzos en una masa de suelo es similar a la obtenida al practicarse una excavación subterránea en un macizo rocoso, ya que los esfuerzos que existían con anterioridad se perturban, y se inducen nuevos esfuerzos en la roca, precisamente en las inmediaciones de la excavación. Un método para representar este nuevo campo de esfuerzos es el de las "trayectorias de los esfuerzos principales", definidas como líneas imaginarias en un cuerpo elástico comprimido a lo largo de las cuales actúan los esfuerzos principales. Resulta útil visualizar el campo de esfuerzos utilizando la analogía aproximada que existe entre las trayectorias de los esfuerzos principales y las líneas de flujo en una corriente tranquila de agua.

En la fig. 3.4 se muestran las trayectorias de los esfuerzos principales mayor y menor en el material que circunda un orificio circular en una placa elástica comprimida uniaxialmente. Las trayectorias de los esfuerzos principales pueden considerarse como si se dividiera el material en elementos sobre los que actúan estos esfuerzos. Del lado derecho de la fig. 3.4, dos de las trayectorias del esfuerzo principal mayor se señalan con líneas punteadas, y en puntos arbitrariamente elegidos sobre estas trayectorias, se muestran los esfuerzos principales que actúan sobre elementos imaginarios. También se observa que los esfuerzos principales distan notablemente de ser verticales y horizontales en las inmediaciones del orificio que desvía las trayectorias de los esfuerzos.

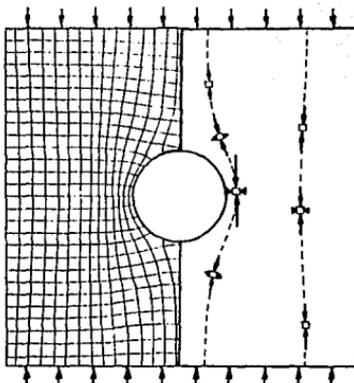


Fig. 3.4 Trayectorias de los esfuerzos principales mayor y menor.

Cuando se coloca un obstáculo de forma cilíndrica tal y como la pila de un puente en la corriente tranquila del agua, el agua tiene que fluir alrededor de este obstáculo y las líneas de flujo se desvían como lo indica la fig. 3.5. En los límites de la obstrucción aguas arriba y aguas abajo, el flujo del agua va más despacio y las líneas de flujo se abren hacia afuera. Esta separación es análoga a la separación de las trayectorias de esfuerzos que suele haber en zonas de esfuerzos a tensión, los cuales se presentarán en el techo y en el piso de una excavación circular que está sujeta a una compresión aplicada uniaxialmente.

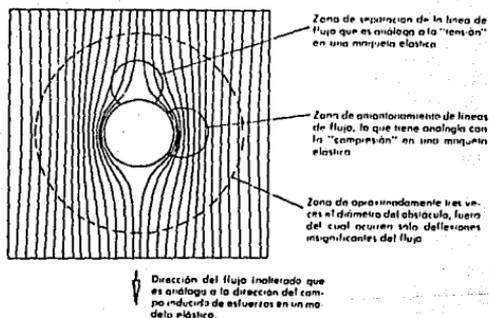


Fig. 3.5 Deflexión de líneas de flujo alrededor de un obstáculo cilíndrico.

En zonas a los lados del obstáculo, el flujo de agua tiene que ir más aprisa para alcanzar al resto del flujo y las líneas de flujo se amontonan (ver fig. 3.5). Esto es semejante al amontonamiento de trayectorias de esfuerzos en zonas de esfuerzos compresivos aumentados. Por otra parte, se muestra que fuera de una zona de aproximadamente 3 veces el diámetro de la obstrucción, las líneas de flujo no se desvían en forma apreciable. Los puntos en el macizo rocoso que se encuentran distantes de 3 radios desde el centro de la excavación, no se ven influenciados, en forma apreciable, por ésta.

3.5.2 Esfuerzos alrededor de una galería aislada de forma circular.

En el análisis de esfuerzos para las cavidades del poniente de la Ciudad de México, es importante resaltar que presentan un desarrollo geométrico tan irregular y variado, imposible de representar con fórmulas sencillas, por tanto, se expondrán los alcances teóricos concernientes a la evaluación y configuración de los esfuerzos en una galería aislada de forma definida. También es importante mencionar lo difícil que resulta adaptar métodos de análisis teóricos a la estabilidad de bóvedas, ya que en general contemplan casos muy idealizados, donde la geometría de las oquedades y el comportamiento de sus materiales, siguen patrones simplificados que distan mucho de presentarse en la realidad.

Estas aclaraciones, en lo que sigue intentan mostrar únicamente ideas generales de los cambios de esfuerzos que tienen lugar en el terreno por la explotación de antiguas minas de arena.

El caso de galerías aisladas es similar al de túneles, donde en base a la teoría de la elasticidad se puede explicar como se redistribuyen los esfuerzos en un medio elástico, alrededor de la excavación.

Para túneles profundos Terzaghi considera un medio elástico, semi-infinito, cuyo peso volumétrico es γ , y emplea las fórmulas de Lamé (1852) para calcular el estado de esfuerzos en cilindros circulares de pared gruesa sujetos a presión interna. Después de un análisis concluyó que el esfuerzo radial σ_r para el caso en que k_0 (relación entre el esfuerzo horizontal y vertical) = 1, es:

$$\sigma_r = D \gamma \left(1 - \frac{r_0^2}{r^2} \right)$$

y el esfuerzo circunferencial:

$$\sigma_\theta = D \gamma \left(1 + \frac{r_0^2}{r^2} \right)$$

donde D = profundidad media del túnel.

r_0 = radio del túnel.

r = radio en el punto donde se analiza el esfuerzo.

sustituyendo para $r = r_0$ (paredes del túnel), se obtiene:

$$\sigma_r = 0$$

$$\sigma_\theta = 2 D \gamma$$

es decir, en un túnel circular, $k_0 = 1$, y no existe ademe, el esfuerzo radial vale cero, y el circunferencial, el doble del peso volumétrico multiplicado por su profundidad media.

En la fig. 3.6 se observa la variación de los esfuerzos radial σ_r y circunferencial σ_θ al alejarse de las paredes del túnel.

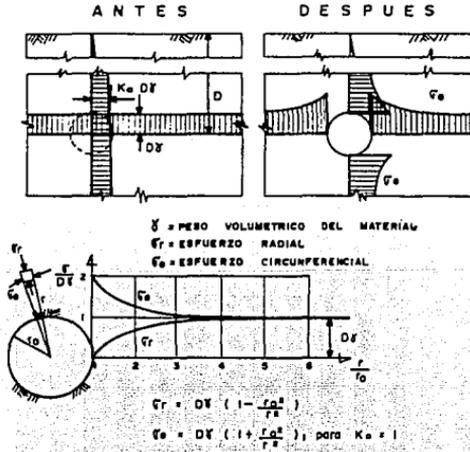


Fig. 3.6 Variación de esfuerzos en un medio elástico, ($k_0 = 1$), al excavar un túnel circular.

Cuando $k_0 \neq 1$, las fórmulas se modifican y así los esfuerzos σ_r y σ_θ dependerán del ángulo en que se midan. La fig. 3.7 muestra la variación de los esfuerzos circunferenciales σ_θ , en función de k_0 y para dos puntos de un túnel circular: su clave ($\theta = 90^\circ$) y su línea media ($\theta = 0^\circ$).

Por otra parte en la fig. 3.8 se aprecia la distribución de los esfuerzos circunferenciales en la pared de una galería de piso plano, paredes verticales y bóveda circular, para el caso en que $k_0 = 0.25$.

Con todo lo anterior puede concluirse que tanto los esfuerzos radiales y los circunferenciales varían en función de la geometría y profundidad de la cavidad o túnel, del peso volumétrico, de la relación k_0 del suelo y de la distancia a las paredes de la galería.

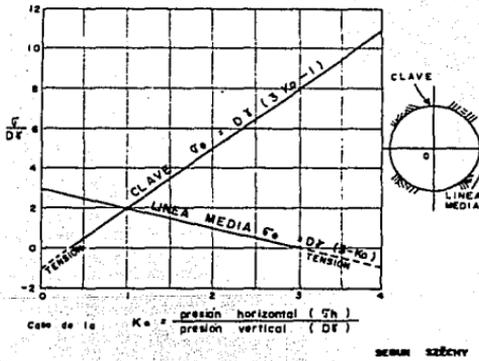


Fig. 3.7 Variación de esfuerzos circunferenciales en clave y línea media de un túnel circular en relación a k_o .

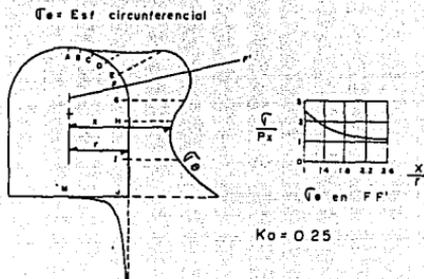


Fig. 3.8 Distribución de esfuerzos circunferenciales en una galería de piso plano (Forma de herradura).

Utilizando la fig. 3.8 se puede comparar el esfuerzo circunferencial σ_{θ} máximo en las paredes de una galería cualquiera, con la resistencia a la compresión simple de los materiales que forman sus paredes, para así obtener una estimación burda de su capacidad para mantenerse estable.

Por otra parte, cabe señalar que cuando los esfuerzos circunferenciales σ_{θ} en las paredes de una cavidad excavada en materiales francamente cohesivos, exceden la resistencia en compresión simple del material, se produce un estado plástico de esfuerzos en el material que rodea a la oquedad, formándose un anillo plástico (cuando $k_0 = 1$). La amplitud del anillo que rodea a la oquedad dependerá de la relación de esfuerzos actuantes y de la resistencia del material. La fig. 3.9 presenta una gráfica que permite estimar la magnitud de la zona plastificada para un material puramente cohesivo.

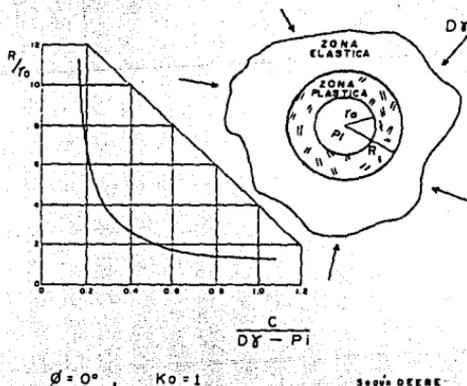


Fig. 3.9 Radio "R" de la zona plastificada en función del radio r_0 del túnel. La cohesión C, el esfuerzo vertical D y la presión del ademe P_1 .

Debe aclararse que cuando la "zona plastificada" llega a la superficie pueden presentarse hundimientos e inclusive colapsos de bóvedas.

Para las cavidades que se localizan a poca profundidad no pueden aplicarse las fórmulas anteriores, ya que el "cilindro" no tiene pared gruesa en la clave. En estos casos se sugiere considerar a la bóveda de la galería como una losa plana, cuya estabilidad puede evaluarse con fórmulas similares a las empleadas para vigas. En este caso, el claro máximo "L" que puede soportar en forma estable una galería es:

$$L = \sqrt{\frac{2\sigma T}{\gamma}} \quad \text{o bien} \quad \sigma = \frac{\gamma L^2}{2T}$$

donde:

σ = esfuerzo de tensión máxima en la "viga de roca".

T = espesor de la viga.

γ = peso volumétrico de la roca.

Cuando los esfuerzos de tensión máxima en la "viga de roca" exceden la resistencia a la tensión del material, se provoca rotura, desmoronamiento progresivo, e inclusive colapso de la bóveda.

3.6 Grupo de galerías.

Este se produce en campos minados cuando las galerías provocan interferencias de esfuerzos mutuas, por haberse construido con separaciones menores de cinco veces su anchura media. Esta condición es común en zonas mineras donde el material de interés económico tiene características razonablemente homogéneas. En este tipo de explotaciones mineras es necesario conciliar el volumen de material extraído, con los pilares de soporte mínimos que deben permanecer como refuerzo del área fig. 3.10.

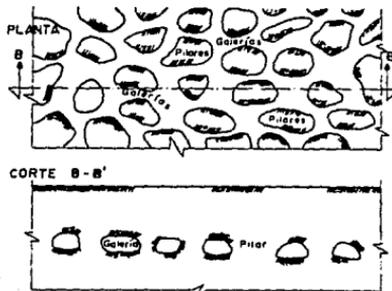


Fig. 3.10 Grupo de galerías y pilares.

En la literatura especializada en minas de carbón, a este método de ataque se le denomina salones y columnas (room and pillar), y a la relación entre el mineral extraído y el que existía originalmente, "porcentaje de extracción". Este porcentaje puede aumentar con el tiempo por desconchamiento de bóvedas, pilares y paredes o bien provocado por una sobreexplotación minera posterior al ataque original (pillar robbing). Ambas condiciones se observan en las cavidades múltiples del poniente de la Ciudad de México, ya que las explotaciones fueron realizadas sin apego a ninguna técnica ni criterio prefijados, como los que ya se aplicaban desde el siglo pasado en otros países.

3.6.1 Distribución de esfuerzos en excavaciones múltiples.

Existe una gran analogía entre el comportamiento del flujo de aguas tranquilas, obstruidas por pilas de un puente como lo muestra la fig. 3.11 y la transmisión de los esfuerzos en los pilares que se encuentran entre una serie de túneles paralelos. De esta analogía se deriva el término teoría tributaria utilizada por algunos autores para describir las trayectorias ramificadas de los esfuerzos y la concentración de esfuerzos verticales en el pilar entre excavaciones adyacentes.

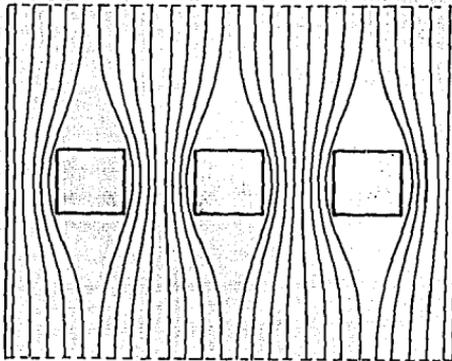


Fig. 3.11 Diagrama de las líneas de flujo en una corriente de aguas tranquilas que encuentran la obstrucción de tres pilas de puentes.

3.6.2 Evaluación de esfuerzos alrededor de un grupo de cavidades.

En los casos donde la extracción de material se realizó através de un campo de galerías que abarcan extensiones horizontales mayores a su profundidad, los criterios expuestos anteriormente para las galerías aisladas no son aplicables, ya que existe interferencia apreciable de esfuerzos entre cada cavidad.

En un conjunto de galerías, la transmisión de esfuerzos de las bóvedas al piso tiene lugar a través de los pilares existentes, donde no se tiene la oportunidad de "puentearlos" ya que no hay material sólido para efectuar tal distribución. Todo el peso del terreno más la sobrecarga que provocan las construcciones en la superficie se transmite íntegramente al piso de las galerías por medio de los pilares que las sostienen.

Debido a la heterogeneidad en la geometría de los pilares y a las propiedades de los materiales que los forman, algunos cargan más que otros e inclusive fallan en primer término provocando una redistribución de esfuerzos hacia otros pilares, o un derrumbe local de la bóveda.

El problema de estabilidad de bóvedas y pilares se resume entonces, en revisar la capacidad de pilares trabajando como tales, recordando que carecen de confinamiento y que su capacidad portante está ligada directamente con la resistencia en compresión simple del suelo que forma el pilar, que en la mayoría de los casos de las cavidades del poniente del D.F., es de tipo granular. Por lo tanto, es indispensable considerar el efecto del intemperismo sobre las propiedades mecánicas del material de los pilares y en su comportamiento a largo plazo.

Una de las teorías manejadas por otros especialistas en excavaciones subterráneas en roca coinciden en que los esfuerzos en cualquier punto de un pilar dependen de:

- a) el esfuerzo medio del pilar que a su vez depende de la relación del área total excavada al área total que queda en las columnas, y
- b) la concentración de esfuerzos, que es una función de la forma del pilar entre excavaciones adyacentes.

En el siguiente apartado se analizarán los efectos de una serie de pilares uniformes en un solo plano horizontal.

3.6.2.1 Esfuerzos medios en los pilares.

Para una mejor comprensión de este problema, se utilizará la distribución típica de salones y pilares cuadrados que se usan en minas de depósitos horizontales, como por ejemplo el carbón, ver fig. 3.12. Suponiendo que los pilares que se muestran forman parte de una gran serie de estos y que la carga de la roca queda distribuida uniformemente sobre estas columnas, el esfuerzo medio para la columna se refleja en:

$$\sigma_r = Pz \left(1 + W_o / W_p \right)^2 = \gamma_z \left(1 + W_o / W_p \right)^2$$

donde:

γ - es el peso unitario de la roca.

z - es la profundidad por debajo de la superficie.

W_o y W_p - son los anchos de la excavación y del pilar respectivamente.

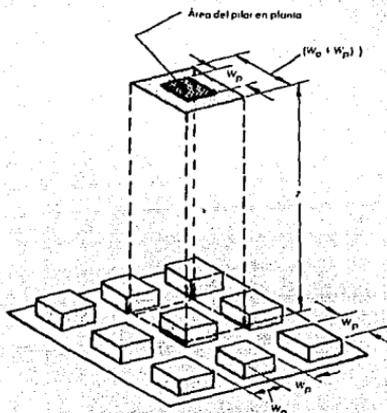


Fig. 3.12 Distribución típica de salones y de pilares mostrando la carga soportada por cada pilar, suponiendo que la carga total de roca esté uniformemente distribuida sobre todos los pilares.

Los esfuerzos medios del pilar para diferentes distribuciones de pilares se resumen en la fig. 3.13 y en todos los casos, el valor de σ_p lo da la relación del peso de la columna de roca cargada por un pilar individual y por el área en planta del pilar.

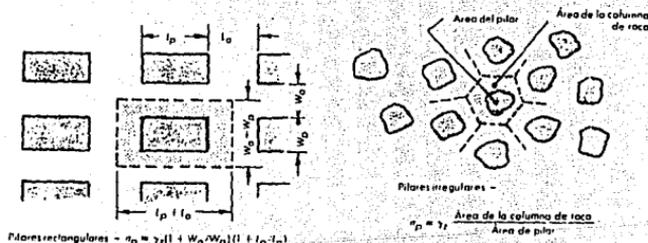


Fig. 3.13 Esfuerzos medios del pilar en diferentes distribuciones de pilares.

3.6.2.2 Influencia de la forma del pilar.

La forma de un pilar entre dos excavaciones adyacentes depende de la forma de las excavaciones y de la distancia entre sí. La forma del pilar tiene una influencia importante sobre la distribución de los esfuerzos dentro del mismo.

Los estudios fotoelásticos elaborados por Ubert y Duvall para determinar la distribución de los esfuerzos en pilares de costilla situados entre varios túneles circulares paralelos, se basaron en un modelo que para este caso fue una placa de maqueta como la mostrada en la fig. 3.14. Esta figura muestra que el esfuerzo medio vertical en la mitad de la altura del pilar se obtiene con:

$$\sigma_p = (1 + W_o / W_p) P_z$$

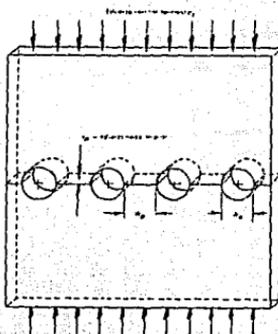


Fig. 3.14 Modelo en placa de maqueta para determinar la distribución de esfuerzos en pilares de costilla.

La distribución del esfuerzo máximo principal σ_1 en la mitad de la altura del pilar puede ser estimada aproximadamente al colocar una encima de otra las distribuciones de los esfuerzos que circundan los túneles individuales, tal y como lo indica la fig. 3.15. Hay que notar que el valor medio del esfuerzo principal máximo σ_1 en el pilar tiene que ser igual al esfuerzo medio del pilar σ_p para satisfacer las condiciones de equilibrio de la maqueta.

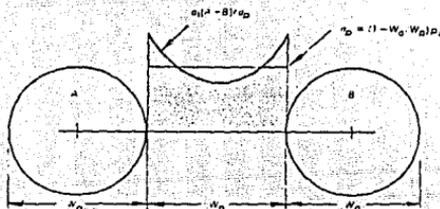


Fig. 3.15 La distribución del esfuerzo principal mayor en un pilar depende del esfuerzo medio del pilar y de la concentración de esfuerzos alrededor de túneles individuales.

Los resultados de Obert y Duvall, para diferentes relaciones de W_0/W_p , muestran que el esfuerzo medio del pilar σ_p aumenta a medida que el pilar se hace más angosto. Por otro lado, la máxima concentración de esfuerzos en la periferia W_0/W_p disminuye cuando los túneles se acercan, esto puede observarse en la figura 3.16.

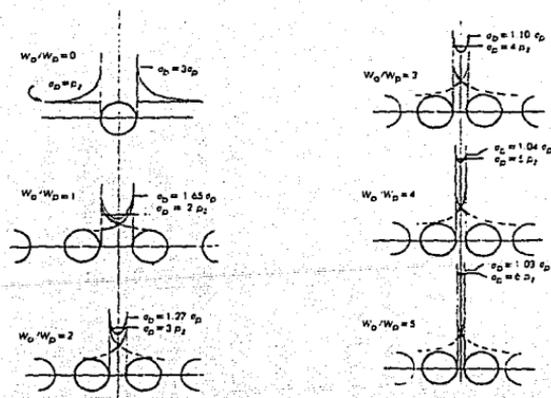


Fig. 3.16 Esfuerzos en pilas de costilla entre túneles circulares paralelos, según Obert y Duvall.

3.7 Migración de cavidades.

Este fenómeno ocurre por el desplazamiento o ampliación de una cavidad hacia la superficie del terreno causado por el desprendimiento progresivo del material que la conforma. Este problema es de relevancia en materiales deleznales, en aquellos suelos granulares cuya compactación es suelta y en materiales poco cohesivos entre otros; la alteración de éstos se acelera más aún por filtraciones de agua que por agentes del intemperismo.

La altura que una cavidad puede alcanzar por migración, suponiendo que el material desprendido queda en el lugar en donde se deposita, puede estimarse a groso modo utilizando la siguiente expresión:

$$h = H \left(\frac{\gamma_1}{\gamma - \gamma_1} \right)$$

donde:

h.- altura total de migración,

H.- altura libre de la cavidad original,

γ_1 .- peso volumétrico del material desprendido y

γ .- peso volumétrico del material que forma la bóveda en estado natural.

La migración de cavidades hacia la superficie se ha observado repetidamente en las minas del poniente de la ciudad, donde una buena parte de ellas se localizan a poca profundidad.

3.8 Efecto de los sismos.

No se cuenta con información suficiente para describir a detalle el comportamiento de terrenos minados ante un evento sísmico, sin embargo, de un caso particular de la zona se pudieron verificar algunos efectos, tales como: desprendimiento de bóvedas en el interior del conjunto de cavidades y daños parciales de pilares como consecuencia de un sismo ocurrido entre dos visitas espaciadas, en unas minas cercanas a la Av. Centenario, localizadas dentro de un lote baldío.

El efecto de un sismo debe considerarse en todo análisis de estabilidad de terrenos minados, debido a la alta sismicidad de la región en que se ubica la Cd. de México y al precario estado de equilibrio que guardan algunos sitios minados; no debe descartarse la posibilidad de fallas que a futuro puedan presentarse por la acción de un sismo.

CAPITULO 4

TRATAMIENTO Y REGENERACIÓN DE ZONAS MINADAS

4.1 Introducción.

En el presente capítulo se hace una breve descripción de parte de los métodos de tratamiento y rehabilitación en zonas minadas, sobre todo, los más utilizados en la práctica en la solución a este tipo de problemas de la zona poniente del D.F., recalcando que la elección de cualquiera de éstos en un problema específico, no procederá sin antes haber definido la geometría, el estado actual de las minas subterráneas, la estratigrafía del sitio y las propiedades índice y mecánicas de los suelos, principalmente de los estratos que forman parte de las paredes de la cavidad por regenerar. Las formas de tratamiento y regeneración que se abordarán en el presente capítulo son:

- a) Relleno e inyección de cavidades.
- b) Excavación y relleno compactado.
- c) Refuerzo de techos y protección contra el intemperismo.
- d) Cimentaciones profundas.

De cada método de tratamiento se describe la metodología general, sus alcances, limitaciones, además de agregar algunas recomendaciones prácticas de obra e ideas sobre sus costos, se incluyen también en algunos casos, ejemplos de aplicación de los tratamientos ejecutados en zonas minadas.

Es importante señalar, que los procedimientos aplicados y los resultados obtenidos en un gran número de casos reales, demostraron que las soluciones aún para problemas del mismo tipo no pueden resolverse de la misma forma; especialmente porque muchos de éstos se alejan de la práctica ingenieril que proporcione la seguridad y economía esperadas.

4.2 Relleno e inyección de cavidades.

Consiste en llenar ordenadamente las cavidades, empleando el material más adecuado y económico que cumpla con las especificaciones señaladas en la obra, procurando llenar la cavidad con materiales semejantes a los extraídos con anterioridad. Se recomienda también considerar la(s) sobrecarga(s) a la(s) que estará sometido el subsuelo en conjunto con el estrato a restituir, para predecir posibles cambios en los procedimientos constructivos así como los asentamientos esperados de las estructuras que se proyecten en dicha área.

En el relleno y la inyección de cavidades, se procurará llenar toda la cavidad utilizando para ello cierta presión, para que la mezcla fluida entre en contacto con las paredes y el techo de las galerías.

Un efecto importante del relleno es el confinamiento que procura a las paredes y pilares entre salones, aumentando con esto su capacidad portante, sin embargo esta operación no es suficiente para recibir las bóvedas, ya que el material de relleno suele contraerse; resulta entonces necesario complementar esta actividad con inyección a presión empleando aditivos expansores, sobre todo en la última fase del llenado.

Es necesario recalcar que este tratamiento debe ajustarse a la economía y seguridad que se espera de cada obra. De la misma forma, el relleno e inyección, puede tornarse más minucioso y sofisticado en cuanto a su procedimiento constructivo, dependiendo estrictamente del destino del terreno regenerado; por ejemplo, en los terrenos destinados a jardines, campos deportivos y vías públicas, los requerimientos de estabilidad en el suelo restituído son mínimos si se comparan con zonas habitacionales o estructuras de gran magnitud.

4.2.1 Etapas del tratamiento.

En este proceso de relleno e inyección de galerías subterráneas se distinguen principalmente cuatro etapas.

1a. Etapa.

Se buscará limitar el área por rellenar formando los diques necesarios dentro de la cavidad por rellenar, para esto pueden utilizarse costales de yute llenos de arena o grava, piedra acomodada a mano o junteada con mortero, o conformar elementos capaces de constituir represas o muros de retención para evitar la fuga de los materiales fluidos colocados en etapas anteriores. En algunos casos se han construido muros de mampostería que limitan un tramo de galería en proceso de llenado, lo cual puede lograrse a través de lumbreras o perforaciones de gran diámetro (60 a 100 cm), que permitan el acceso del personal de obra al interior de la cavidad. Los elementos construidos para llevar a cabo esta primera etapa quedarán integrados a la estructura de suelo restituída. Conjuntamente deberá efectuarse una labor de limpieza general en el interior de la galería, extrayendo la basura, lodo y materia orgánica.

2a. Etapa.

Consiste en colocar la mayor cantidad posible de material inerte y sano en bloques, acomodados sobre el piso de las galerías y dejando espacios de suficiente amplitud para permitir el flujo del relleno (3a. Etapa). Para efectuar esta actividad pueden utilizarse los materiales que se encuentran sueltos en el interior de la cavidad, o materiales cuya geometría permita su introducción y acomodo dentro de la misma. Conviene emplear materiales de resistencia adecuada y que permanezcan estables a través del tiempo.

3a. Etapa.

En esta fase se vertirá desde el exterior un relleno fluido, que al fraguarse adquiera la resistencia adecuada, se debe procurar primeramente el llenado de las partes más profundas y bajas de las galerías. El relleno masivo de la cavidad a tratar se hará utilizando mezclas de gran fluidez que ofrezcan a su fraguado la resistencia especificada en la obra. Las propiedades del fluido deben ser acordes al equipo empleado y a los métodos para su colocación. Si para esta actividad se emplearan bombas, se recomienda que los agregados sean finos y de baja viscosidad; por el contrario, si se transportan en carretilla hasta el sitio de su colocación, podrán acomodarse a mano y además incluirse agregados gruesos como boleos y fragmentos de roca. Cabe señalar la importancia que tiene la elección, podrán acomodarse a mano y además incluir agregados gruesos como boleos y fragmentos de roca. Es muy importante la elección del material para el llenado de cavidades, ya que este repercute en forma directa en los costos del tratamiento, porque los volúmenes utilizados en obra para este tipo de trabajos son de consideración al compararlos con el costo total de una obra civil.

Algunos de los materiales que pueden usarse en la preparación de mezclas fluidas, en distintas proporciones son: el cemento, cal, puzolana, mortero, grava, arena, tepetate, suelo del lugar, bentonita, aditivos fluidizantes, entre otros. Las proporciones entre los componentes de una mezcla suelen establecerse por peso, resultando más útil su determinación por volumen aparente, por ejemplo:

Materiales	Peso (kg)	Volumen aparente (l)	Volumen real (l)
Agua	583	583	583
Cemento	150	100	50
Bentonita	15	10	7
Arena	900	600	360

Para lograr un mejor control en las proporciones para elaborar una determinada mezcla, debe conocerse la densidad de los sólidos por emplear, el peso volumétrico aparente y el contenido de agua de los materiales. También debe controlarse la resistencia final de la mezcla, su viscosidad y estabilidad conforme a las pruebas usuales de laboratorio.

4a. Etapa.

Es la última fase de este proceso y consiste en inyectar lechadas con aditivos expansores a presión, para sellar con esto los huecos más pequeños dejados por el relleno fluido al contraerse. Esta actividad se efectuará una vez que el relleno haya fraguado y experimentado la contracción inherente a este proceso. Pueden emplearse lechadas estables de gran fluidez, con aditivos expansores, colocadas a una presión tal que no exceda apreciablemente las debidas al peso propio del terreno, a fin de no ocasionar en él, desplazamientos y agrietamientos severos.

Todo el proceso de relleno e inyección para cavidades subterráneas deberá supervisarse en todas sus etapas, posteriormente se verificará mediante perforaciones sobre las cavernas los resultados de esta actividad, con el fin de establecer si se cumplieron los objetivos trazados en el proyecto.

Las figuras 4.1 y 4.2 presentan los croquis correspondientes al procedimiento de llenado de una galería desde la superficie y a partir de un acceso lateral en la cavidad.

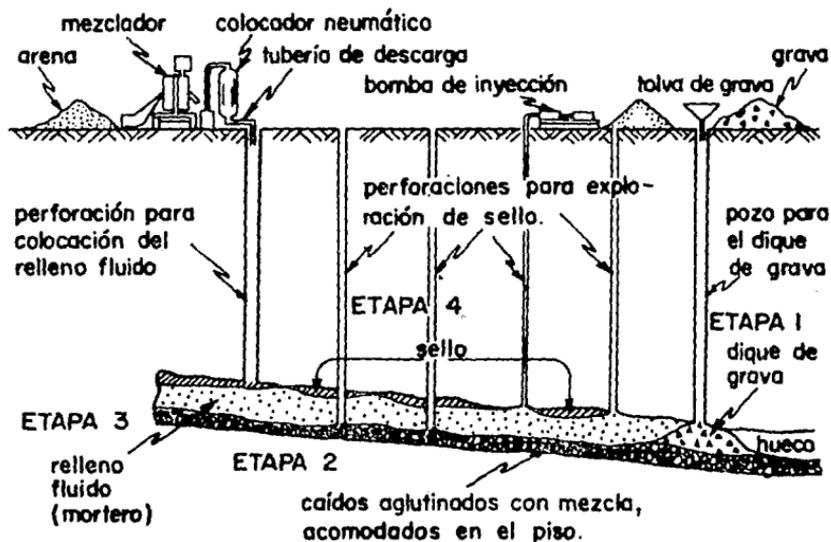


Fig. 4.1 Sección transversal de una galería en la que se muestra el método de relleno a base de una mezcla de cemento y arena, inyectada a través de perforaciones.

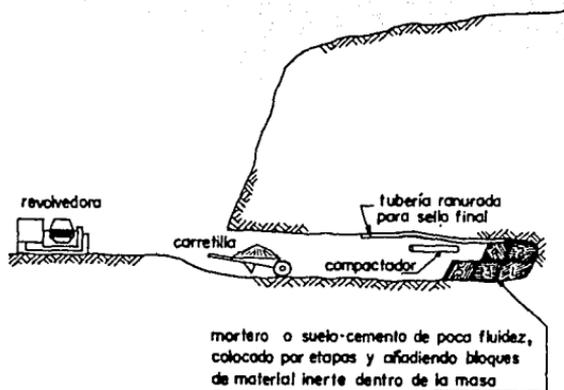


Fig. 4.2 Relleno de galerías con acceso a nivel.

4.2.2 Recomendaciones prácticas.

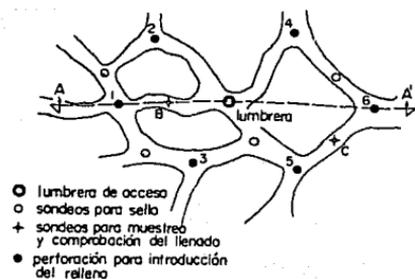
Si ya se han seleccionado los materiales idóneos y económicos para el relleno de cavidades, debe planearse a continuación el método más adecuado para su introducción y acomodo, para lo cual será indispensable conocer a detalle la topografía de las galerías, en altimetría y planimetría, así como su desarrollo subterráneo; con todo esto se podrán ubicar los sitios para hacer las perforaciones necesarias, por las que se llevará el material al interior de las galerías y a través de las cuales, si se trata de lumbreras, se controlará el proceso de llenado.

En la superficie del terreno podrán ubicarse zonas para el almacenamiento de los materiales a usar, protegiéndolos contra la acción del intemperismo.

Deberá de proveerse del equipo de mezclado más adecuado a los materiales por procesar y con los dispositivos para su dosificación por volumen o peso. Para la introducción de los materiales al interior de las cavidades puede emplearse una bomba, ya que por lo general, en el proceso de llenado, la mezcla fluida recorre una cierta distancia horizontal desde el sitio de mezclado hasta la perforación alimentadora. En el interior de las galerías pueden requerirse mangueras para conducir el fluido a los puntos más bajos y así facilitar el acomodo de la mezcla inyectada.

No debe olvidarse la separación de las áreas por rellenar, construyendo los diques indispensables para evitar la fuga de los materiales que actúan como fluidos y para llevar un control adecuado del llenado de una zona previamente identificada. Si el piso de las galerías es sensiblemente horizontal, conviene separar cada una de las áreas por rellenar mediante muros de retención.

Las lumbres de acceso deben localizarse en puntos donde concurren dos o más galerías (fig. 4.3); su función, además de permitir inspeccionar y verificar el proceso, es dar seguridad al personal que trabaja en el interior de las galerías, proporcionando ventilación e iluminación eléctrica suficiente.



(a) planta

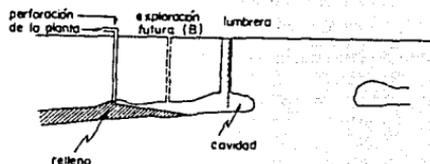


Fig. 4.3 Aspectos prácticos del relleno de cavidades.

4.2.3. Aspectos económicos.

El costo que implica el uso de rellenos e inyección, se ve afectado principalmente por las instalaciones en obra que representan un porcentaje importante del costo total del tratamiento de regeneración, el cual se incrementará, a medida que los volúmenes de inyección sean menores.

Otros factores que afectan los costos para este tipo de trabajo lo constituyen el relleno y el cementante, como se aprecia en la evaluación de volúmenes y alcance económico de los trabajos de relleno e inyección de cavidades, presentado en el Anexo 2.

4.2.4. Ejemplo de aplicación.

Se trata del Conjunto Urbano Mixcoac, cuya planta se muestra en la fig. 4.4. Enseguida se presentarán las actividades ejecutadas en cada etapa del proceso de relleno. En la primera etapa, las galerías que conducían al exterior se obturaron con muros de mampostería. En la segunda etapa se usó el material sano encontrado dentro de las galerías; solo en algunos casos se efectuó la demolición en la parte superior para el paso de las mezclas de inyección. la tercera y cuarta etapas se realizaron en cuatro fases, tal y como se describe a continuación:

En la fase 1 se procedió con el relleno grueso de cavidades utilizando las mezclas A y B anotadas en la tabla 4.1.

Tabla 4.1 Proporcionamiento de las mezclas empleadas en las fases 1, 2 y 3.

FASE					
Primera	A	1	2.5	4	10
	B	1	3.5	6	14
Segunda	C	1	3	2	6
	D	1	8	4	9
Tercera	E	1	10	3	7
	F	1	5	2	2

El orden de mezclado de los materiales fue muy importante para asegurar la homogeneidad de la mezcla inyectada. Primeramente se mezcló la bentonita con el agua, a continuación el cemento, y por último la arena.

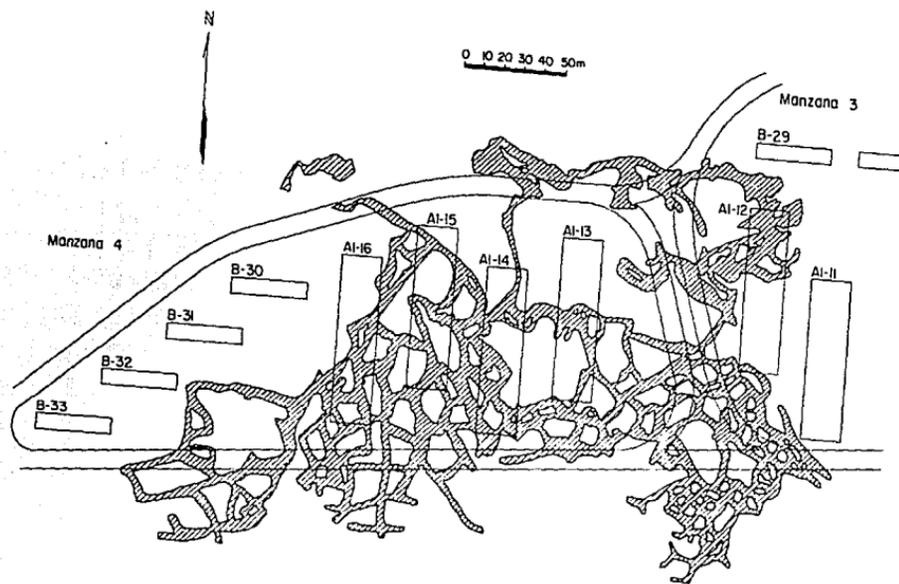


Fig. 4.4 Configuración de las minas en las manzanas 3 y 4 del Conjunto Urbano Mixcoac.

En la fase 2, se llenaron los huecos más pequeños producidos al enjatsarse el relleno anterior, empleando las mezclas C y D.

En la preparación de algunas mezclas se presentó segregación y para evitarla se usó cloruro de calcio.

Las inyecciones de la 1a. y 2a. fase se hicieron por gravedad, sin aplicar presión alguna al material fluido y conformando un 92% del volumen total requerido para el relleno de la cavidad. Se efectuaron pruebas de resistencia a la compresión simple a los 28 días de fraguado, a las mezclas preparadas del relleno, las resistencias obtenidas variaron entre 10 y 40 kg/cm². En la 3a. fase se inyectaron a presión (aproximadamente 2 kg/cm²) las mezclas E y F, hasta que el consumo para el relleno fuera menor de 0.25 m³ en un lapso de 15 minutos.

Cuando se encontraron zonas con excesivo consumo de lechada, se realizaron perforaciones formando una cuadrícula de 7.5 m (solo en aquellas áreas donde el proyecto establecía la construcción de edificios), modificando la mezcla de la 2a. fase.

En la 4a. fase, se hicieron perforaciones para verificar el contacto de las mezclas inyectadas con la clave de la cavidad, encontrándose en algunos casos la presencia de pequeños huecos (menores de 5 cm), los que se cubrieron con las mezclas E y F. Durante esta última fase, se presentó, en una zona donde las cavidades se encontraban a 6 m de profundidad, una fuga de lechada que emergió a la superficie por pequeñas grietas verticales en el terreno, fenómeno que se atribuyó a una excesiva presión de inyectado. Al respecto, debe recalcar la importancia que tiene el limitar la presión de inyectado al valor γT , donde T es el techo de las galerías y γ es el peso volumétrico natural del terreno.

La proporción de mezcla usada con mayor frecuencia en este trabajo fue: cemento 120 kg, arena 530 l, agua 670 l y bentonita 30 kg.

4.3 Excavación y relleno compactado.

Otro de los métodos para la regeneración de terrenos minados, cuando éstos se encuentran a poca profundidad; consiste en derrumbar los techos de las cavidades y rellenar el espacio comprendido entre el piso de ellas y la superficie del terreno, mediante material compactado; sin embargo se tiene conocimiento de un gran número de casos, en los que esta solución no fue apropiada por deficiencias en los procedimientos constructivos, lo que ocasionó un mal comportamiento de las cimentaciones apoyadas sobre estos rellenos. Por este motivo conviene tratar la solución con mayor detalle, sobre todo en cuanto a los procedimientos constructivos se refiere.

4.3.1 Trabajos para la regeneración.

Frecuentemente la actividad principal que se realiza en el método de excavación y relleno compactado, consiste en derrumbar los techos empleando maquinaria como los tractores equipados con arado. La serie de trabajos previos y finales se indican a continuación:

- a) Localización de cavidades en planta y en perfil.
- b) Despalle del predio.
- c) Trazo en la superficie del contorno de las cavidades.
- d) Excavación con tractor, colocando el material excavado a un costado del área de la(s) cavidade(s). Un aspecto que no debe pasar inadvertido; la evaluación del peso del tractor durante la actividad de excavación, ya que al disminuir el techo de la cavidad, el equipo puede caer en forma conjunta con el suelo que forma parte del techo de la cavidad ocasionando severos daños materiales; algunas recomendaciones para evitar esta situación son: si el techo de la cavidad es alto empezar por excavar una pequeña fracción del área hasta alcanzar el piso de la cavidad, posteriormente demoler el techo de abajo hacia arriba, con ataque frontal o derrumbarlo por otro frente según sea el caso.

- e) Colocación y compactación del material de relleno en capas, a partir del piso limpio de la(s) cavidad(es). Para el relleno de cavidades puede usarse el material producto de la excavación siempre y cuando cumpla con las pruebas de laboratorio especificadas en el proyecto. Los valores obtenidos en las pruebas deben cumplir al menos con las propiedades de un material que se utiliza para terracerías, limitando el grado de compactación a un valor mínimo del 95% de la prueba próctor. Sin embargo, las exigencias pueden ser mayores si los rellenos fuesen a soportar estructuras de importancia.

Otro de los recursos para derrumbar bóvedas consiste en el uso de explosivos, para este caso se requiere estudiar el número de barrenos y la cantidad de explosivos, lo que dependerá de la dureza del material. Este procedimiento será evaluado por las autoridades correspondientes para que en todo caso, sean éstas las que autoricen o cancelen el uso de explosivos para estos fines. Generalmente para las tobas cementadas de la zona de las lomas, una carga de 300 g/cm³ es suficiente para provocar el derrumbe de techos, si se utiliza dinamita al 60%. Sin embargo, la carga puede variar desde 100 g/cm³ para "aflojar el terreno" hasta 80 g/m³ en conglomerados bien cementados.

Se debe tener especial cuidado en el proceso de la compactación de rellenos, porque como ha de saberse, algunas estructuras que se proyecten a futuro pueden quedar desplantadas en una parte del relleno y estar afectadas por hundimientos diferenciales debido a la insuficiencia en el proceso de compactación.

Si llegaran a utilizarse rellenos de mala calidad en este procedimiento y además se proyecta la construcción de estructuras muy pesadas, es recomendable desplantar su cimentación bajo los rellenos, ligándolos con traveses cuando se vayan a soportar cargas transmitidas por muros o columnas intermedias, trabajando en forma de puentes como se aprecia en las figuras 4.5 y 4.6.

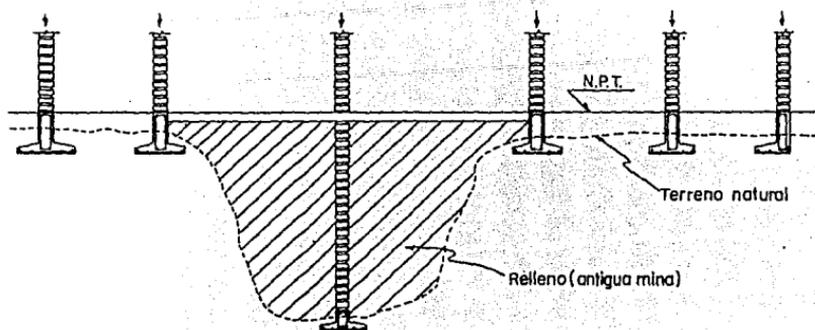


Fig. 4.5 Desplante de una zapata bajo el relleno.

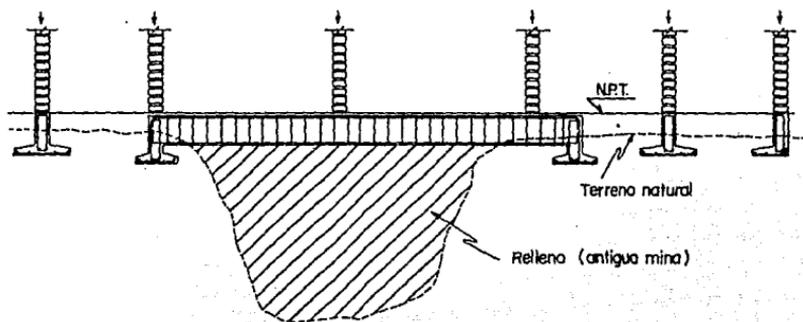


Fig. 4.6 Trabe utilizada como puente para liberar el relleno.

4.3.2 Evaluación de costos.

Para tener una idea aproximada de los costos en la excavación y relleno compactado, deberán considerarse varios aspectos entre los que destacan: la densidad de cavidades con respecto al terreno donde se localizan; la profundidad de las galerías subterráneas y el volumen a compactar en la cavidad. Entre otros factores a considerar en este rubro pueden mencionarse a los materiales a utilizar, el equipo de excavación, acomodo y compactado del material de relleno, el control de calidad de los procedimientos constructivos y la supervisión de los trabajos.

4.3.3 Limpieza y acomodo de rellenos sueltos y heterogéneos.

Actualmente existen terrenos minados donde han fallado los techos en forma natural o artificial, debido principalmente a que éstos se rellenaron con basura o materiales en forma inadecuada. Son frecuentes los rellenos conformados por bloques desprendidos del terreno original, superpuestos y con grandes huecos entre ellos, cubiertos por basura y otros materiales heterogéneos. La fig. 4.7 ilustra esta irregularidad.

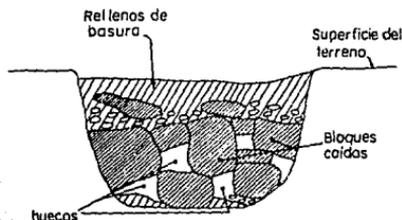


Fig. 4.7 Relleno heterogéneo y suelto que con frecuencia se encuentra en las zonas minadas.

Ante estas condiciones, los rellenos están sujetos a la acción de filtraciones, del intemperismo, y otros factores, además experimentan alteraciones traducidas en enjramientos y, por tanto, en hundimientos de la superficie y de estructuras apoyadas sobre este tipo de rellenos. En ocasiones este efecto se ve agravado por el arrastre de partículas finas provocado por el agua infiltrada. Las soluciones adoptadas cuando se detectan este tipo de rellenos son:

- Retiro total de la basura y de los materiales sueltos dentro de la cavidad, hasta alcanzar el terreno natural o piso de la mina, posteriormente proceder a su relleno con materiales seleccionados y bien compactados.
- Si se pretende desplantar una estructura en estos sitios, resulta conveniente que la cimentación se apoye sobre el piso de las cavidades, para lo cual deberán prolongarse las columnas o muros de carga. Una variante para efectuar este procedimiento consiste en construir trabes con las que se "puenteará" la fracción de la estructura ubicada en una zona de rellenos (figs. 4.5 y 4.6).

La elección de alguna de estas dos alternativas dependerá del espesor, volumen y forma de acomodo de los rellenos y del tipo de obra por construir, así como de la magnitud de los asentamientos tolerables, cuya predicción es incierta a partir de las pruebas más usuales de laboratorio.

4.3.4 Excavaciones sin relleno.

Este procedimiento solo es recomendable en predios baldíos de gran extensión destinados en el futuro a uso habitacional, que abarcan una loma o parte de ella, donde las minas subterráneas se encuentren a poca profundidad y representen en planta un porcentaje alto del área total (densidad de cavernas), puede convenir abatir la superficie original por lo menos hasta el piso de éstas, sin el uso de rellenos compactados. La solución está condicionada por una configuración topográfica apropiada, debiendo cumplir con los requisitos del proyecto urbanístico previo, así como los tiempos requeridos para desalojar en forma económica los fuertes volúmenes de material excavado. Los trabajos por desarrollar en este rubro pueden implicar cortes de gran altura en el perímetro, cuya estabilidad debe estudiarse.

Dentro de la zona poniente, en la fracción del extremo oriente de la Loma de Capula y en la franja norte de la misma loma, colindante con la rama sur del Río Becerra, se efectuaron trabajos de excavación sin relleno, destacando que la solución para la primera fracción resultó defectuosa por no haber excavado lo suficiente, originándose zanjas (restos de galerías) rellenas con material suelto.

4.4 Refuerzo de techos y protección contra el intemperismo.

La aplicación de este tratamiento resulta útil en galerías angostas o salones sostenidos por pilares del mismo material; consiste en reforzar la bóveda mediante un arco de concreto reforzado, o mediante muros de mampostería con un recubrimiento en el techo y paredes de las galerías con objeto de prevenir su intemperización.

4.4.1 Tipos de refuerzo.

Fundamentalmente existen tres formas de estructuración y refuerzo para soportar las cargas al nivel de las galerías.

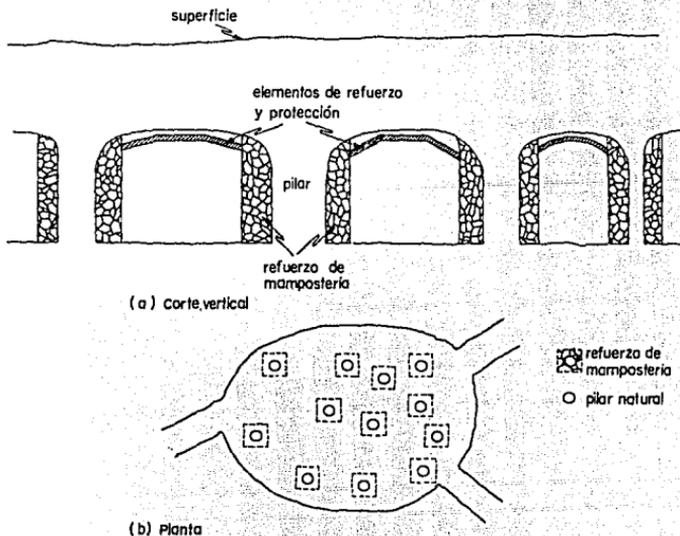
- Muros de mampostería.
- Refuerzo de pilares naturales.
- Arcos o bóvedas de concreto.
- Recubrimiento con concreto lanzado.

4.4.1.1 Muros de mampostería.

Con estos se pretende reducir el claro libre de las cavidades e incrementar su capacidad de carga, para soportar nuevas estructuras y a la propia bóveda. Los muros deben desplantarse en terreno firme bajo el piso de las cavidades; en su parte superior debe garantizarse un buen contacto con la bóveda, esto puede lograrse a base de "rajuela" de piedra y mortero con aditivo expansor. Como parte de esta solución es indispensable recubrir las paredes y clave para evitar la acción del intemperismo, lo cual es posible lograr mediante muros de tabique y losas precoladas en el techo, o bien usando concreto lanzado. Como aplicación, cabe señalar que esta solución se empleó en una de las construcciones, ubicada en la calle Joaquín Pardavé de la col. Olivar del Conde.

4.4.1.2 Refuerzo de pilares naturales.

Otra alternativa o complemento a los muros de mampostería, consiste en utilizar concreto o mampostería para reforzar los salones sostenidos por pilares (fig. 4.8). En esta solución también es indispensable recubrir paredes y bóvedas, para evitar el efecto del intemperismo reduciendo así el desprendimiento del material de la cavidad subterránea.



4.4.1.3. Arcos o bóvedas de concreto.

Con el uso de arcos o bóvedas de concreto en minas subterráneas, se pretende mejorar la capacidad para soportar las cargas debidas a las estructuras y al techo de terreno natural. La carga a la que estarán sujetos, considerando que su trabajo equivale al de un ademe, podrá evaluarse empleando el criterio de Terzaghi, aplicable al caso de suelos cohesivo-friccionantes. La expresión general es la siguiente:

$$P_b = B_1 \frac{\gamma - \frac{C}{B_1}}{K \tan \phi} (1 - e^{-k \tan \phi T / B_1})$$

donde:

- P_b = presión vertical sobre el ademe.
- $B_1 = 1/2 B + H \tan (45^\circ - \phi/2)$.
- H = altura de la cavidad.
- γ = peso volumétrico del material del techo.
- c = cohesión del material del techo.
- k = coeficiente empírico $\cong 1$
- ϕ = ángulo de fricción interna del material del techo.
- T = techo.
- e = base de logaritmos naturales.

La figura 4.9 muestra un esquema de distribución de presiones en galerías.

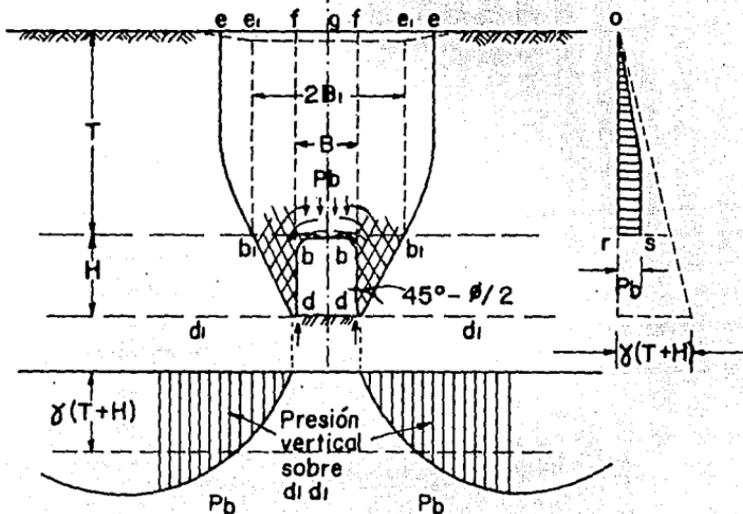


Fig. 4.9 Distribución de presiones en una galería

En caso de que la bóveda vaya a soportar el peso de construcciones, debe considerarse el incremento de presión en el ademe.

A partir de la presión vertical total a que estará sujeto el arco, se calculará su peralte y la cantidad de acero de refuerzo que requiere. En el cálculo no debe olvidarse que la presión vertical no es uniforme, debido a la heterogeneidad de los materiales que conforman la bóveda.

Los arcos pueden apoyarse sobre muros de tabique o mampostería, que también tienen la función de proteger las paredes de las galerías subterráneas contra el intemperismo.

4.4.1.4 Recubrimiento con concreto lanzado.

Dicho método es recomendable en galerías profundas, cuando no afectan la estabilidad del terreno y construcciones que le sobreyacen, para esto se utiliza el concreto lanzado que protegerá a la cavidad contra el intemperismo además de evitar su migración. El recubrimiento se hará empleando concreto lanzado, reforzado con malla de acero electrosoldada.

La práctica ingenieril permite establecer que los espesores suficientes para el recubrimiento, pueden situarse en el rango de 5 a 10 cm y con esto proteger paredes y techos de galerías subterráneas, contra la acción del intemperismo.

El uso del recubrimiento de concreto lanzado tiene sus limitaciones, por lo tanto, deberán estudiarse primeramente las propiedades del material de las paredes y clave de la cavidad. También se requiere que las paredes de la cavidad sean capaces de soportar la presión a la que se aplica el concreto, y por otro lado, espacio suficiente para realizar esta operación.

Otra limitante en la aplicación de este método, lo representan las condiciones de flujo de agua a través del terreno, ya que pueden provocar el arrastre de materiales o una carga adicional por saturación del suelo que forma el techo de las cavidades.

4.4.2 Comparación de costos entre varias soluciones para tratar cavidades.

Estas comparaciones resultaron de varias obras ejecutadas en campo, idealizando algunas condiciones de trabajo, por tal motivo deben considerarse solo como un antecedente, ya que los resultados y variables presentes en cada tratamiento o regeneración de cavidades, difieren bastante para cada caso en particular. Las soluciones a comparar son: a) derrumbe de techos y relleno compactado, b) arcos y bóvedas, y por último c) inyección. A continuación se describen brevemente las variables que influyen de manera notable en el costo de cada solución, así como algunos parámetros que permiten establecer un criterio práctico para la elección de alguna de estas alternativas de tratamiento.

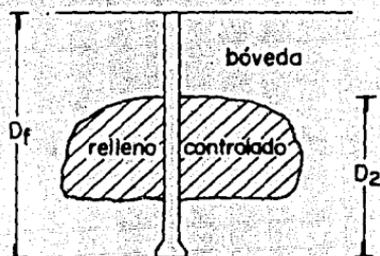
En el caso de derrumbe de techos y relleno compactado, el costo varía en relación directa con la profundidad, ya que se incrementa o reduce el volumen por excavar; en cambio, en la solución a base de arcos y bóvedas, el costo dependerá principalmente del ancho de la cavidad, ya que a mayor ancho corresponderá un arco más robusto y en consecuencia más costoso. Al efectuar un análisis de costos en una cavidad de 2.5 m de altura y distintos anchos, pudo observarse que cuando las cavidades tienen techos inferiores a 3.5 m, resulta más conveniente su derrumbe; en tanto que para cavidades con techos mayores de 4 m resulta más económico construir arcos o bóvedas. También se dedujo que para cavidades localizadas a una profundidad mayor de 7 m es más económico inyectarlas que derrumbar su techo y efectuar un relleno compactado.

4.5 Cimentaciones profundas.

Este tema se tratará como una solución al problema de terrenos minados y no como un método de tratamiento y regeneración de cavidades. Es importante recalcar que esta alternativa se utiliza frecuentemente, cuando se desplantan estructuras que transmiten al subsuelo cargas de consideración, donde la relación costo de cimentación contra costo total de la obra es bajo, o en los casos donde la construcción en un determinado predio es obligada y no es factible la aplicación de uno de los procedimientos de tratamiento y regeneración señalados. La solución contempla cimientos profundos colados en el sitio, como lo son las pilas con o sin campana, desplantadas en un estrato competente localizado bajo el piso de las cavidades.

En la solución de cimientos profundos, es indispensable el conocimiento detallado de la geometría y el estado actual de las cavidades, así como la estratigrafía y propiedades mecánicas del suelo de apoyo de las pilas.

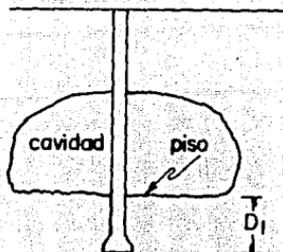
Para asegurar la estabilidad del techo de una cavidad al utilizar pilas, es indispensable efectuar un tratamiento previo como: un relleno controlado e inyección o muros para reforzar la bóveda, la presión efectiva para evaluar la capacidad de carga de las pilas, será función de la profundidad de desplante D_f si el techo llega a gravitar sobre el relleno, de lo contrario, dependerá solo de D_2 . Estas consideraciones se basaron suponiendo que la presión efectiva original (γD_f) se reduce a cero en el nivel de piso de las cavidades, al ser excavadas sin considerar sus dimensiones, restituyéndolas en forma parcial o total por el peso del relleno y por la acción que éste pudiera ejercer en la bóveda. La capacidad de carga lateral de las pilas suele ser alta por dos razones: la naturaleza del subsuelo de la zona de lomas y el confinamiento del relleno contenido en la cavidad. Por estos motivos es aceptable en el diseño, considerar a las pilas como elementos cortos.



(a) cavidad rellena

Fig. 4.10 Pila desplantada bajo el piso de una cavidad rellena.

En pilas construídas a través de cavidades sin rellenas, incluyendo la alternativa de muros para reforzar la bóveda, la presión efectiva para evaluar la capacidad de carga de las pilas, será función de la profundidad de desplante D_f bajo el piso de la cavidad, fig. 4.11.



(b) cavidad sin rellenar

Fig. 4.11 Pila desplantada bajo el piso de una cavidad sin rellenar.

La capacidad de carga, para ambos casos de cavidad rellena o vacía, puede estimarse a través del criterio de Meyerhof. El valor de los factores de capacidad de carga (N_c y N_q) dependerán de la profundidad de penetración de los cimientos en el estrato de apoyo, respecto al horizonte superior de este.

Es importante recalcar que al construir pilas a través de cavidades sin rellenar, se requiere del uso de camisas en el espacio libre, lo que encarece la solución. Los procedimientos constructivos para esta solución resultan sencillos, si se toma en cuenta que el nivel freático se halla a gran profundidad en la zona de lomas, y a que las paredes de las perforaciones se sostienen por sí solas sin el empleo de ademes o lodos.

Las losas de piso en planta baja, pueden requerirse, por ejemplo cuando existen en la superficie rellenos de gran espesor que se comprimen por peso propio. Esto a su vez puede ser causa de fuerzas de fricción negativa en las pilas y de baja a nula contribución para soportar fuerzas horizontales.

Por último, en la zona de lomas es muy común que las formaciones de material pumítico presenten rotura de los granos, afectando directamente la compresibilidad y resistencia al corte de los estratos en cuestión. Aunque este problema no se toma en cuenta al proyectar cimentaciones en esta zona, requiere a futuro la profundización de su estudio ya que es un problema poco conocido.

4.6 Recomendaciones para elegir la solución de tratamiento y regeneración de zonas minadas, construidas o por construir.

Cabe mencionar que todas las soluciones son complicadas y costosas. Y aunque el factor económico es determinante al elegir una de ellas, con frecuencia la solución queda obligada, por un lado a la geometría y estado de las cavidades y, por otro, al tipo y características de la obra o del inmueble afectado. En la tabla 4.2, se señala la utilización viable de cada solución para la combinación de áreas extensas y reducidas, edificadas o por edificar, condicionada a los factores económicos y constructivos además de otros factores que se señalan en la parte inferior de la tabla.

Tabla 4.2 Utilización viable de cimentación y tratamiento del subsuelo en áreas minadas construidas o por construir.

Relleno e inyección.	si	si	si (1)	si (1)
Excavación y relleno compactado.	no (2)	si	no	no (3)
Refuerzo y protección contra el intemperismo.				
a) con bóveda o arcos	si (1, 4)	si (1, 4)	si (1, 4)	si (1, 4)
b) sólo con muros	si (4)	si (4)	si (4)	si (4)
c) mortero lanzado	no (5)	no (5)	no (5)	no (5)
Cimientos profundos.	no (1, 6)	si (1, 6)	no (1, 6)	si (1, 6)

(1) es muy costosa

(2) excepto en el caso especial de convenir la reconstrucción total de colonias muy precarias, con fuerte deficiencia urbana y carencia de servicios.

(3) excepto que las minas se encuentren a poca profundidad y que el procedimiento no dañe propiedades o inmuebles vecinos.

(4) el trabajo se ejecuta fundamentalmente desde el interior de las minas, requiere de accesos seguros para el personal y materiales; sólo se recomienda en terreno poco o nada susceptible a intemperizarse, lo que ocurre con poca frecuencia.

(5) tiene fuertes limitaciones, su uso sería excepcional.

(6) sólo se justifica en construcciones importantes u obligadas.

El tratamiento de aplicación más viable para cualquier condición de terreno y de las construcciones, sin perder de vista las ventajas que otras soluciones podrían tener en cada caso particular consiste en utilizar relleno e inyección. En este caso, para condiciones difíciles y peligrosas de trabajo, aunque la alternativa resulta más costosa, puede sustituirse el relleno grueso colocado desde el interior por morteros vaciados por gravedad e inyecciones de lechadas estabilizadas, realizadas desde el exterior. En esta solución, el empleo de los suelos del lugar puede representar una ventaja económica, por lo que conviene estudiar sus propiedades.

Toda solución debe apoyarse en un estudio minucioso de la geometría y del estado actual de las cavidades, así como de la estratigrafía y propiedades del subsuelo. En el caso de predios enclavados en un sitio con cavidades, debe contemplarse la extensión de los estudios y el tratamiento de la cimentación hacia los predios vecinos y preferentemente a toda el área, en virtud del costo y seguridad del conjunto y de la propia obra. Si esto no es posible, por lo menos debe dejarse constancia del estado del terreno en las vecindades inmediatas, ya que de lo contrario la situación de peligro que pudiera existir queda del todo oculta y por tanto, es fácil que pase inadvertida en el futuro.

CONCLUSIONES:

El conocimiento de la estratigrafía de los suelos existentes en la zona poniente del D.F., representada en la columna tipo de la Formación Tarango, debe considerarse como la base para lograr la identificación de antiguas minas subterráneas y para inferir la presencia de posibles cavidades artificiales en el subsuelo de la zona que se pretenda investigar; es también un antecedente en la formulación de presupuestos cuyos trabajos están encaminados a la investigación del subsuelo en estos sitios, permitiendo establecer con ello, programas de exploración y de laboratorio más apegados a la realidad.

La exploración en zonas minadas depende de su grado de complejidad, por lo tanto su investigación debe apoyarse en diversos métodos, ya sean directos, semidirectos y/o indirectos; siendo indispensable que el o los programas de exploración se planteen atendiendo a las características propias de cada caso, recordando que pueden variar ampliamente los programas finales de los iniciales, no sólo en los métodos a utilizar para la investigación de cavidades y su extensión, sino también de manera importante en los costos para efectuarlos.

Los mejores resultados en la investigación de cavidades una vez que se han identificado por cualquiera de los métodos conocidos, será siempre la inspección interna que permite determinar la geología, geometría, grado de alteración así como su estabilidad, apoyándose en la topografía tanto en planimetría como altimetría y su muestreo para determinar sus propiedades índice y mecánicas.

Cualquier análisis tendiente a determinar el estado de esfuerzos y deformaciones en las cavidades del poniente de la Ciudad de México, se dificulta y llega a ser imposible, salvo casos excepcionales; ya que la geometría de las galerías, salones y pilares; la evaluación de las propiedades mecánicas de los suelos, la influencia de los agentes del intemperismo y la imposibilidad de predecir otros factores así lo demuestran. Las teorías presentadas para este análisis se fundamentan en excavaciones subterráneas de forma circular, idealizando bastante el problema de por sí complicado, sin embargo, su conocimiento teórico facilita el entendimiento físico y los mecanismos de falla de utilidad en la toma de decisiones; por lo tanto, las soluciones y decisiones que se tomen para resolver tal problema dependerán concretamente de la experiencia y criterio del ingeniero especialista en la materia.

Para el tratamiento y regeneración de zonas minadas existen cuatro procesos que representan soluciones muy costosas, en las que la relación costo de tratamiento contra costo de las obras en proyecto o de inmuebles existentes, es elevada; ya que por un lado dependerán de la extensión del área y características del terreno minado y, por otro, del tipo de obras existentes o por construir. Por lo tanto, la elección de cualquiera de los procesos de tratamiento y regeneración debe apegarse a las condiciones imperantes en cada caso; exceptuando el método de tratamiento de cavidades a base de rellenos e inyección que puede aplicarse a cualquier caso sin importar sus condiciones particulares, aunque en ocasiones, no se utiliza en predios pequeños destinados a casas habitación. En áreas extensas como colonias y fraccionamientos construidos en los que el terreno muestra un marcado grado de alteración, constituye la única solución y la más usada, reduciendo notablemente el costo total cuando para dicho relleno e inyección se utilizan suelos y materiales del lugar.

Otra solución, cuando los materiales que componen a las cavidades subterráneas se encuentran sanos y son susceptibles a intemperizarse, consiste en la construcción de muros a lo largo de la cavidad para reforzar su techo, resultando además de económica muy eficiente.

Se recomienda que el tratamiento a través de la excavación y relleno compactado se realice solo en colonias muy precarias en las que conviene la regeneración total, o en terrenos baldíos donde se tiene planeado la construcción de obras.

El tratamiento de cavidades más costoso en comparación con los que ya se citaron, resulta ser el de las cimentaciones profundas, ya que se realiza en forma alternada otro tratamiento como lo es el relleno controlado o refuerzo con muros para asegurar la estabilidad de los techos de las cavidades existentes.

Debido a que la mancha urbana va extendiéndose hacia los extremos de la Ciudad de México, se recomienda la reglamentación para controlar su crecimiento hacia las zonas minadas, evitando la construcción de obras y asentamientos irregulares por estas zonas. En este sentido, la legislación sobre el uso del suelo puede apoyarse en el inventario de cavidades subterráneas y así evitar daños irreparables tanto materiales como humanos.

BIBLIOGRAFÍA :

1. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos.
El subsuelo y la ingeniería de cimentaciones en el área urbana del Valle de México.
México, ed. SMMS, 1978.
263 p.
2. Reséndiz, Daniel, Springall, Guillermo y et. al.
Información reciente sobre las características del subsuelo y la práctica de la ingeniería de cimentaciones en la Ciudad de México.
México, ed. Instituto de Ingeniería (UNAM), 1970.
59 p.
3. Sánchez Rojas, Luis Edmundo.
Estratigrafía relativa a detalle de la Formación Tarango, al poniente de la Ciudad de México.
Tesis (Ingeniero Geólogo).
México, Facultad de Ingeniería (UNAM), 1987.
63 p.
4. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos.
Cimentaciones en zonas minadas de la Ciudad de México.
México, ed. SMMS, 1976.
204 p.
5. Secretaría General de Obras del Departamento del Distrito Federal.
Manual de exploración geotécnica.
México, ed. DDF, 1988.
93 p.

6. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos.
Geofísica aplicada a la geotecnia.
México, ed. SMMS, 1985.
171 p.

7. Juárez Badillo, Eulalio y Rico Rodríguez, Alfonso.
Mecánica de suelos.
Tomo I.
3a. ed.
México. Ed. LIMUSA, 1974.
642 p.

8. Hoek, Evert y T. Brow, Edwin.
Excavaciones subterráneas en roca.
tr. Raymundo Dely.
U.S.A., Ed. Mc. Graw Hill, 1980.
634 p.

9. D. H. Griffiths y R. F. King
Geofísica aplicada para ingenieros y geólogos.
tr. Angel Río De La Cruz.
España, Ed. Paraninfo, 1972.
231 p.

10. Comisión Federal de Electricidad.
Manual de Diseño de Obras Civiles.
Geotecnia B.3.2.
México, ed. CFE, 1979.

11. D.D.F. Delegación Alvaro Obregón.
El Fantasma de la Delegación Alvaro Obregón.
México, Ed. D.D.F., 1994.
111 p.

12. B. Dobrin, Milton
Introducción a la prospección geofísica.
tr. José Ma. Fuster y Pablo Martínez Strong.
2a. ed.
España, Eds. Omega S. A., 1961.
483 p.

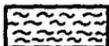
ANEXO 1

PERFILES ESTRATIGRÁFICOS

S I M B O L O G I A



ARCILLA.



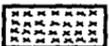
LIMO.



ARENA.



GRAVA.



RELLENO.

PROFUNDIDAD (m)	SIMBOLOGIA	DESCRIPCION	NUMERO DE GOLPES PARA PENETRACION STANDAR			
			10	20	30	40
0	XXXX XXXX XXXX XXXX XXXX XXXX XXXX XXXX XXXX XXXX XXXX XXXX XXXX XXXX XXXX XXXX XXXX	Relleno de limo arenoso, mal compactado y contaminado de cascajo y pedacitos de tabique.				
5						
	TTTT TTTT TTTT TTTT TTTT TTTT TTTT TTTT TTTT TTTT TTTT TTTT TTTT TTTT TTTT TTTT TTTT TTTT	Limo arenoso o arena limosa de compactacion densa en la parte superior y muy densa en la parte inferior, con algunos lentos de arena pumfica.				
10		FIN DEL SONDEO				
15						
20						

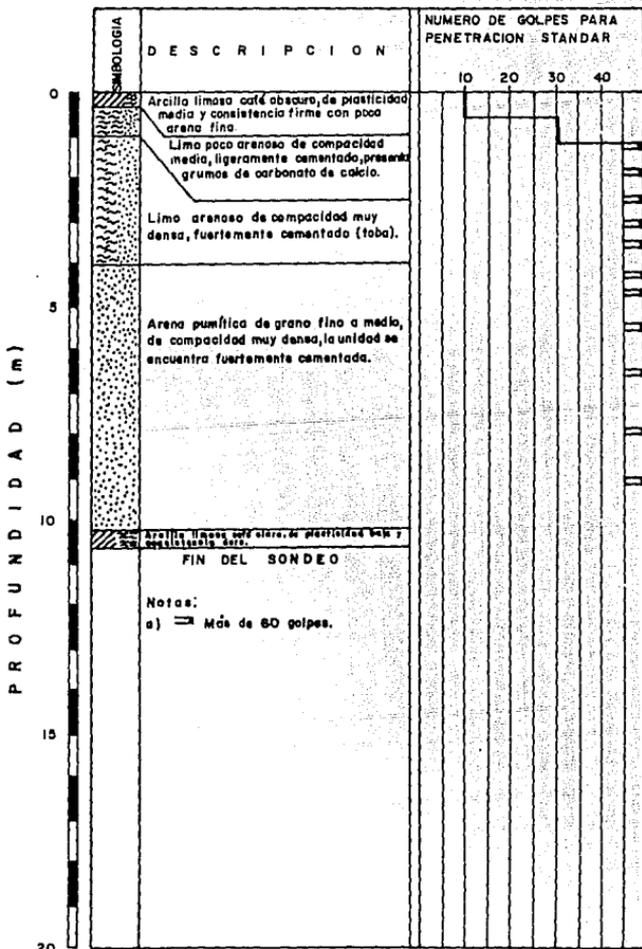
SONDEO DE AVANCE SA-6
ESTUDIO I. AV. BECERRA 98

PROFUNDIDAD (m)	SIMBOLOGIA	DESCRIPCION	NUMERO DE GOLPES PARA PENETRACION STANDAR			
			10	20	30	40
0		Arena limosa de grano grueso, color gris claro, de compacidad muy densa, el material presenta algunas gravas y bolsos aislados.				
5				B. D.		
				B. D.		
10						
		Arena limosa de grano grueso, color café rojizo, de compacidad muy densa, con algunas gravas.				
				B. D.		
15		Arena de grano grueso color gris claro de compacidad muy densa.				
	FIN DEL SONDEO					
	Notas: a) Más de 60 golpes. b) B. D. Barril Denison.					
20						

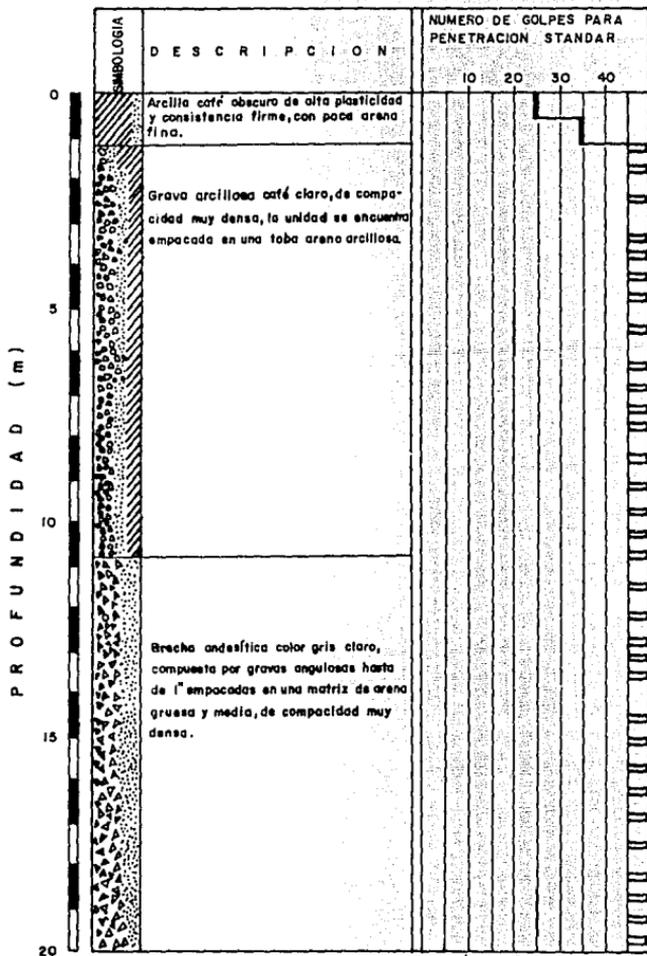
SONDEO MIXTO SM-1
ESTUDIO 2. AV. OBSERVATORIO Y SUR 136, COL. AMERICAS

PROFUNDIDAD (m)	SIMBOLOGIA	DESCRIPCION	NUMERO DE GOLPES PARA PENETRACION STANDAR				
			10	20	30	40	
0		<p>Arena de grano medio color café claro, de compacidad muy densa con algunas gravas aisladas.</p> <p>N > 50 golpes</p>					
5							
10							
15							<p>Arcilla arenosa color café claro, de baja plasticidad y consistencia dura, con algunas gravas aisladas.</p> <p>N > 50 golpes</p>
20							<p>Limo arcilloso color café claro, de compacidad muy densa, con intercalaciones de arena pumfítica.</p> <p>N > 50 golpes</p>

SONDEO DE PENETRACION ESTANDAR SPE-1
 ESTUDIO 3. COL. AMPLIACION LA MEXICANA



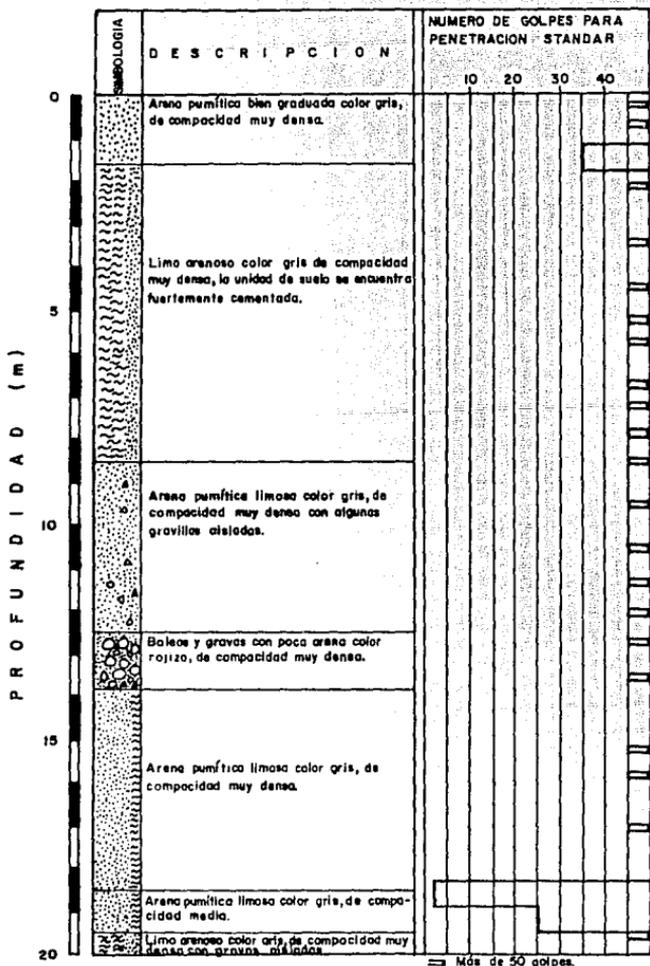
SONDEO DE PENETRACION ESTANDAR SPE-1
ESTUDIO 4. PALO ALTO, D.F.



SONDEO DE PENETRACION ESTANDAR SPE-2
ESTUDIO 5. AV. TAMAULIPAS N.º 257, COL. SANTA LUCIA

P R O F U N D I D A D (m)	L I T O L O G I A	D E S C R I P C I O N	N U M E R O D E G O L P E S P A R A P E N E T R A C I O N S T A N D A R			
			10	20	30	40
0	x x x x x x x x x x x x x x x x x x	Relleno heterogéneo compuesto por cascajo y fragmentos de tabique, ligeramente compactado.	10	20	30	40
1			10	20	30	40
2			10	20	30	40
3			10	20	30	40
4			10	20	30	40
5			10	20	30	40
6			10	20	30	40
7			10	20	30	40
8			10	20	30	40
9			10	20	30	40
10			10	20	30	40
11			10	20	30	40
12			10	20	30	40
13			10	20	30	40
14			10	20	30	40
15			10	20	30	40
16			10	20	30	40
17	10	20	30	40		
18	10	20	30	40		
19	10	20	30	40		
20		F I N D E L S O N D E O				

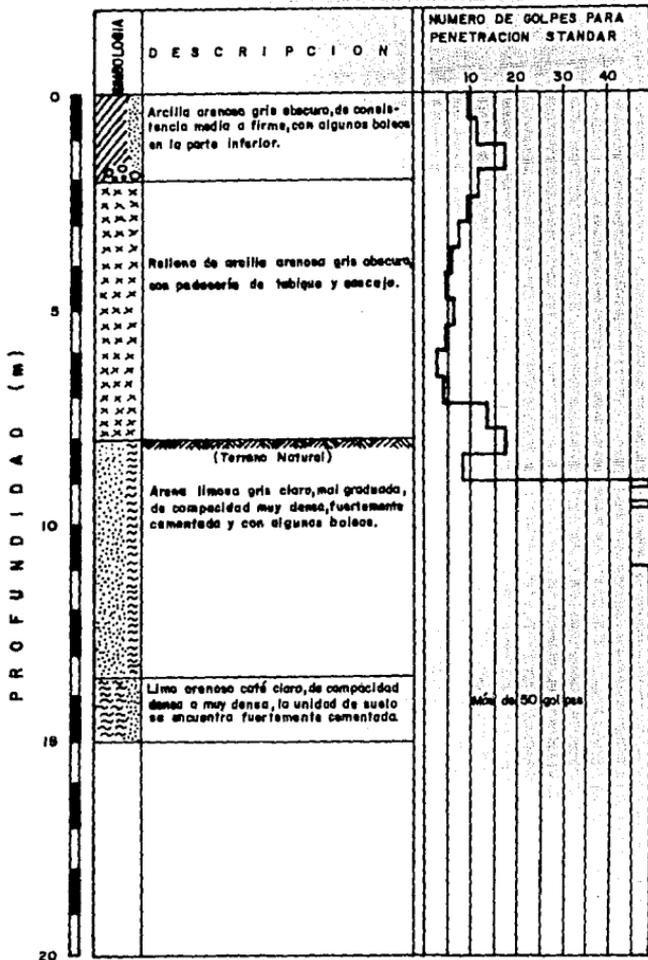
SONDEO DE PENETRACION ESTANDAR SPE-2
ESTUDIO 6. AV DE LOS CONSTITUYENTES N. 1100 y 1080



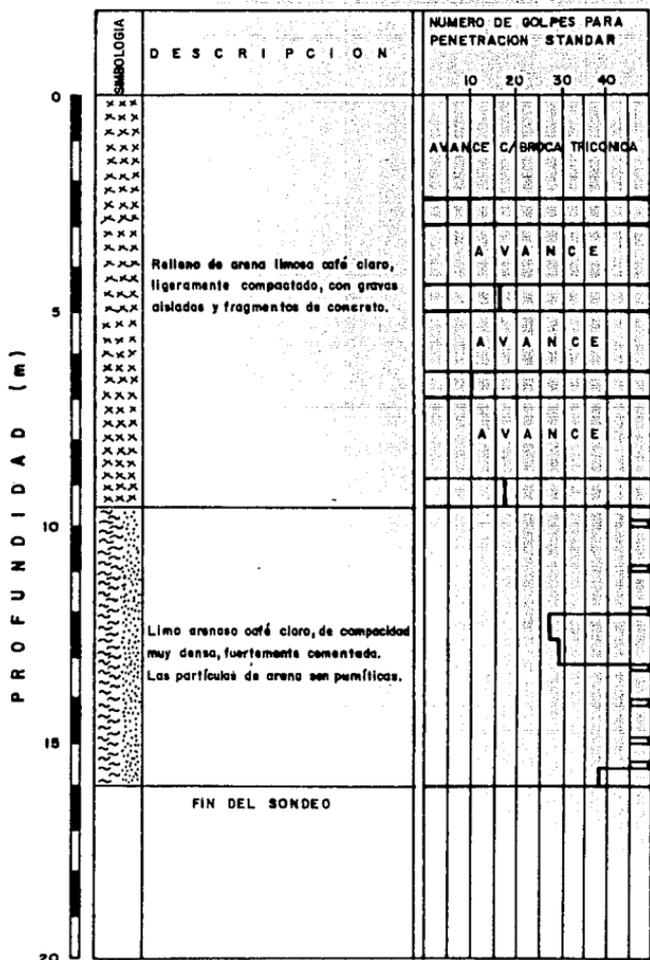
**SONDEO DE PENETRACION ESTANDAR SPE-1
ESTUDIO 7. COLINAS DE TARANGO, DELEG. ALVARO OBREGON**

PROFUNDIDAD (m)	SIMBOLOGIA	DESCRIPCION	NUMERO DE GOLPES PARA PENETRACION STANDAR			
			10	20	30	40
0		Limo arenoso gris claro de compacidad densa.				
		Arena fina y gruesa andesítica.				
		Arcilla arenosa gris oscura de baja plasticidad y consistencia media a firme.				
1						
2		Arcilla arenosa café claro de baja plasticidad y consistencia muy firme, con partículas aisladas de cuarzo, andesita y pumicita.				
3						
4		FIN DEL SONDEO				
5						

POZO A CIELO ABIERTO PCA-15
 ESTUDIO 8. CAMINO REAL A TOLUCA No. 1150



SONDEO DE PENETRACION ESTANDAR SPE-2
 ESTUDIO 9. AV. 5 DE MAYO N.º 290, COL. MERCED GOMEZ

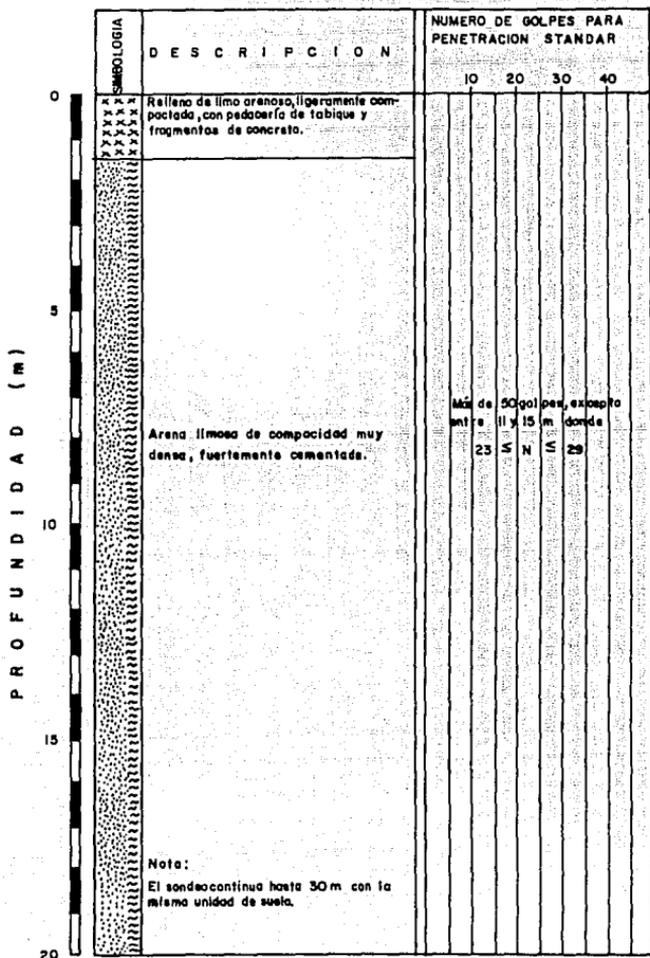


⇒ Más de 50 golpes.

SONDEO DE PENETRACION ESTANDAR SPE-1
ESTUDIO 10. ESQUINA DE LA CALLE HENEQUEN Y BONDOLITO,
COL. NIDAL 60

PROFUNDIDAD (m)	SIMBOLOGIA	DESCRIPCION	NUMERO DE GOLPES PARA PENETRACION STANDAR			
			10	20	30	40
0	XXXX XXXX XXXX XXXX	Repleno de limo arenoso ligeramente compactado con cascajo y pedacitos de tabique.				
5		<p>Arena limosa café grisáceo de compactación suelta a media, con algunas gravas aisladas.</p>				
10		FIN DEL SONDEO				
15						
20						

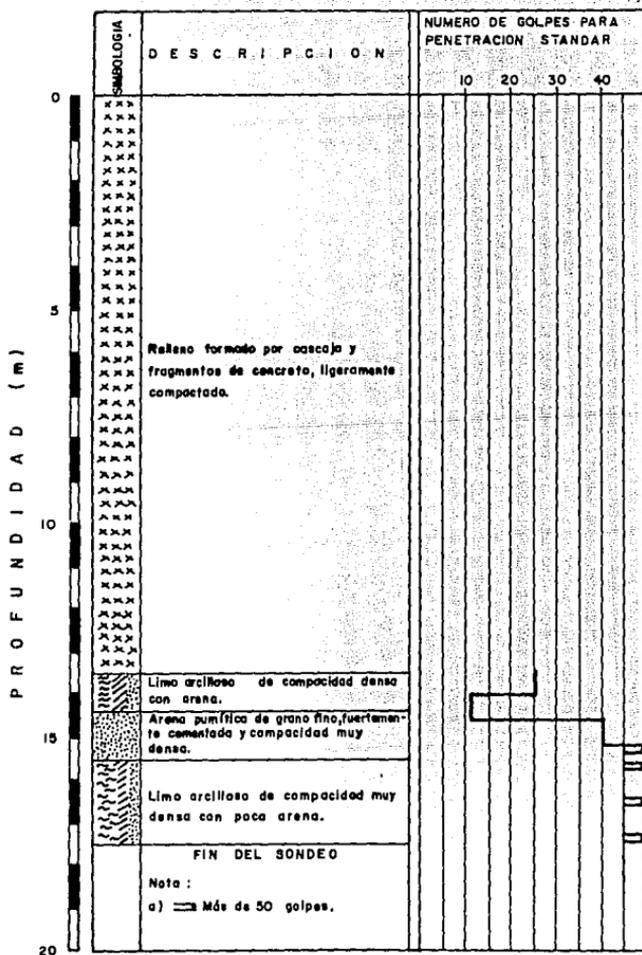
SONDEO DE AVANCE SA-6
ESTUDIO II. PILARES No. 5, COL. LAS AGUILAS

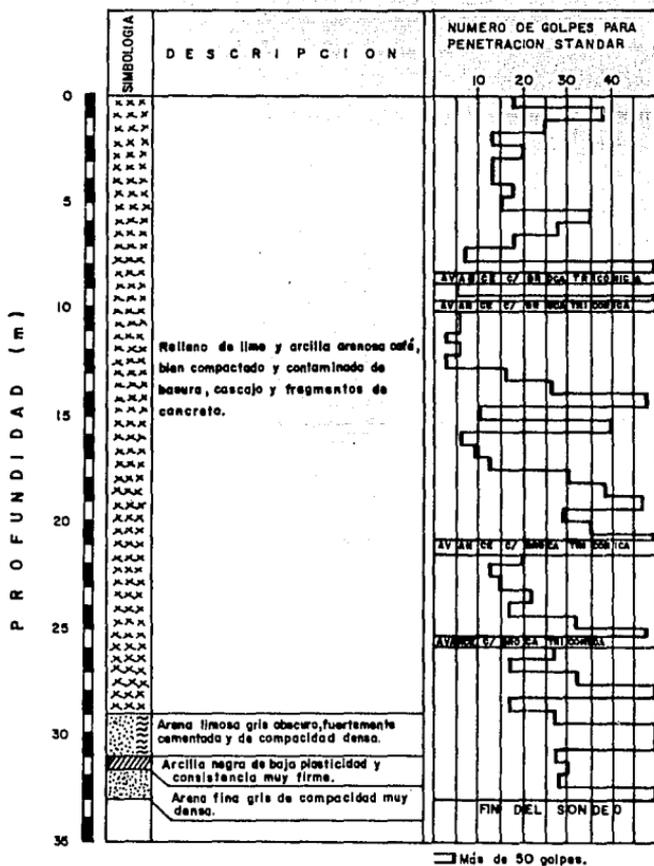


SONDEO MIXTO SM - 1
ESTUDIO 12. CALZ. LAS AGUILAS N. 453

PROFUNDIDAD (m)	LITOLOGIA	DESCRIPCION	NUMERO DE GOLPES PARA PENETRACION STANDAR			
			10	20	30	40
0		Relleno de limo arenoso, de mal compactado a bien compactado a mayor profundidad, contaminado de cascajo.				
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10		Limo arenoso de consistencia densa a muy densa, fuertemente cementado. (To be)				
11						
12						
13						
14						
15		FIN DEL SONDEO				
20						

SONDEO DE AVANCE SA-3
 ESTUDIO 13. CAMINO REAL A TOLUCA N. 1150, STA. FE TACUBAYA

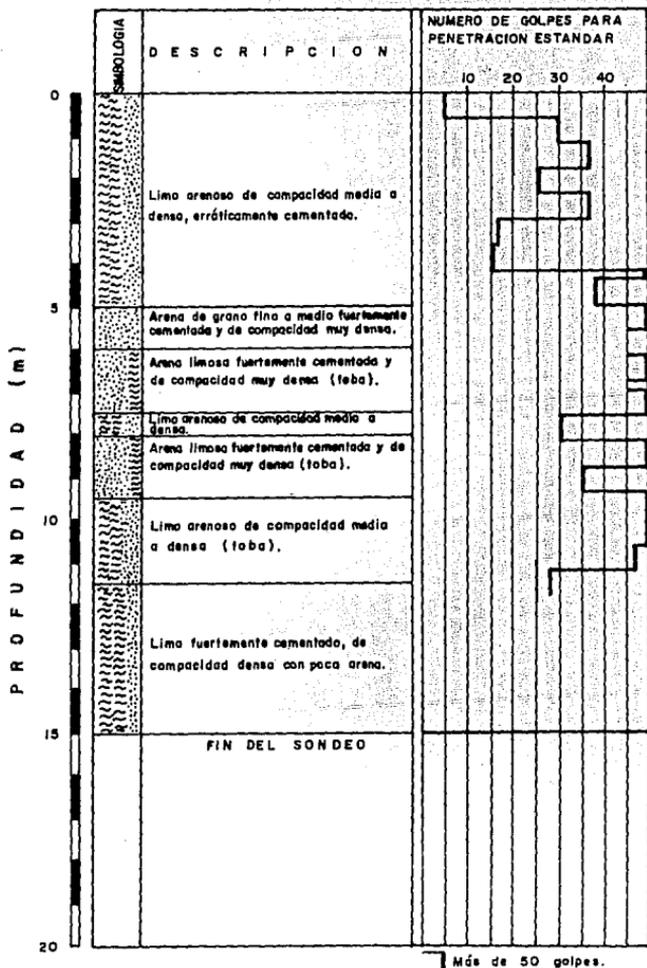




SONDEO DE PENETRACION ESTANDAR SPE-2
ESTUDIO 15. STA. LUCIA N.º 810, COL. OLIVAR DEL CONDE

PROFUNDIDAD (m)	LITOLOGIA	DESCRIPCION	NUMERO DE GOLPES PARA PENETRACION STANDAR			
			10	20	30	40
0		Limo arenoso café claro, de compacidad densa a muy densa (toba).				
5			Arena limosa fuertemente cementada y de compacidad densa.			
10			Limo arenoso café, de compacidad densa.			
15		FIN DEL SONDEO				
20						

SONDEO DE AVANCE SA-9
ESTUDIO 16. CALLE PARALELA 7 S/N, COL. MOLINO DE STO. DOMINGO



ANEXO 2

INFORME DE PROSPECCIÓN DE CAVIDADES

INFORME DE PROSPECCIÓN DE CAVIDADES, COL. 1o. DE SEPTIEMBRE DEL MUNICIPIO DE ATIZAPÁN DE ZARAGOZA, REALIZADO EL 5 DE ABRIL DE 1994.

1.- Prospección geofísica:

La zona en general presenta un rango de resistividad que oscila entre 1 y 40 ohms-m. Estos valores se pueden considerar como representativos de la "Formación Tarango" que se localiza en esta colonia, también se pudo apreciar un incremento en las resistividades que van desde 50 a 200 ohm-m, en los sitios afectados por la minería, cambios litológicos, cavidades o zonas de debilidad por fracturamiento.

Con los levantamientos realizados se detectaron las siguientes anomalías cuyos valores de resistividad se encuentran entre el rango de 50 a 200 ohm-m:

- Calle Zaragoza.- Cadenamientos de 4 al 20 m (50 a 76 ohm-m).
- Calle Pino Suárez.- Cadenamientos de 0 a 20 m (50 a 54 ohm-m).
- Calle Alvaro Obregón.- Cadenamientos de 0 a 48 m y 76 a 112 m (50 a 80 ohm-m y 50 a 56 ohm-m).
- Calle Lázaro Cárdenas.- Cadenamientos de 32 a 112 m (57 a 88 ohm-m).
- Calle Allende.- Cadenamientos de 32 a 48 m.
- Calle Francisco Villa 1A - 1A.- Cadenamientos de 0 a 12 m (52 a 700 ohm-m).
- Calle Francisco Villa 1B - 1B.- Cadenamientos de 176 a 184 m (52 a 56 ohm-m).
- Calle Hungría.- No se observan anomalías de interés.

2.- Resultados de la barrenación:

Al efectuar 10 barrenos perforados con broca tricónica, a profundidades de: 19 m, 16.10, 13.50, 13.50, 22, 12, 12, 15, 15 y a una profundidad de 15.50 a 16.80 a la oquedad le sobreyace un estrato compuesto por un limo poco arcilloso de consistencia baja, debajo de la cavidad se halló una capa de arena de grano grueso, de espesor indefinido ya que se encontró hasta la máxima profundidad explorada.

De los resultados obtenidos en los sondeos de exploración, se informó lo siguiente: el material de la zona de estudio consiste en una toba bien consolidada con fracturamientos serios en las colindancias de las cavidades encontradas.

3.- Resultados de la apertura de lumbreras y bocaminas:

Se detectaron 4 bocaminas y al excavar una lumbrera se pudieron apreciar los accesos a las siguientes cavidades:

- Cavity Alvaro Obregón.
- Cavity Javier Mina.
- Cavity Emiliano Zapata.
- Cavity López Mateos.

4.- Inspección geológica subterránea:

A) *Cavity Alvaro Obregón.*- La cavidad en su totalidad presenta una serie de derrumbes internos muy marcados, producto del fracturamiento escalonado en la zona provocando grandes caídos en bloques en su interior. La mayoría de sus columnas se encuentran erosionadas producto de infiltraciones excesivas, aunadas por el grado de intemperismo que es muy alto. La migración en la cavidad es grave y tiende a crecer rápidamente.

B) *Cavidad Javier Mina*.- Presenta una explotación irregular, soportada por columnas irregulares, la mayoría fracturadas y algunas erosionadas por efectos del intemperismo e infiltraciones pluviales. En la parte frontal se encuentra muy marcada la migración hacia la superficie. El material explotado en esta cavidad consiste en una arena pumítica.

C) *Cavidad Emiliano Zapata*.- Presenta pocos caldos, la migración hacia la superficie va en aumento, el material se encuentra poco intemperizado debido a las bajas infiltraciones pluviales.

D) *Cavidad López Mateos*.- No presenta problemas de consideración.

5.- Levantamiento topográfico subterráneo y superficial.

Los resultados de estos trabajos permitieron determinar la geomorfología interna de las cavidades; diámetros; altura y ubicar las viviendas afectadas por las mismas.

A) *Cavidad Emiliano Zapata*.- Alcanza alturas de 1.60 a 4.00 m y anchos de 3.00 a 4.60 m y hasta 7.0 m en zonas con caldos. La profundidad de la cavidad con respecto a la superficie varía desde la entrada de la bocamina de 1.20 m y hasta 27.0 m a lo largo de su desarrollo.

B) *Cavidad Alvaro Obregón*.- Su altura varía de 0.70 a 2.50 m, los anchos de cavidad se sitúan entre 4.20 y 5.50 m. La profundidad de la cavidad con respecto a la superficie del terreno natural desde la bocamina hasta el último ramal explorado es de 1.60 y 9.0 m respectivamente.

C) *Cavidad López Mateos*.- Su altura es de 2.50 m, el ancho varía de 3.50 a 4.20 m, la bocamina se localizó sobre un camino de terracería, la profundidad máxima de la cavidad con respecto a la superficie es de 14.40 m.

D) Caverna Javier Mina.- Su altura varía de 2.40 a 3.50 m, su ancho entre 1.50 y 5.40 m, su profundidad con respecto al nivel del terreno natural es de 4.0 a 13.0 m a lo largo de todo su desarrollo.

6.- Colocación de bancos de nivel y corridas de nivelación:

Se llevó un control estricto de posibles asentamientos colocando bancos de nivel en cada caverna explorada:

- A) Caverna Alvaro Obregón 9 piezas.
- B) Caverna Javier Mina 6 piezas.
- C) Caverna Emiliano Zapata 5 piezas.

Se efectuaron un total de 7 corridas de nivelación con los siguientes resultados:

- A) Caverna Alvaro Obregón.- Se detectaron asentamientos que no rebasan los 5 mm.
- B) Caverna Javier Mina y Emiliano Zapata.- Sin asentamientos.

7.- Resumen de conclusiones.-

Clasificación de riesgo:

CAVIDAD	APECTACIONES	RIESGO
Alvaro Obregón	6 viviendas	Alto
Emiliano Zapata	5 viviendas	Alto
Javier Mina	5 viviendas	Alto
López Mateos	Ninguna	No existe

8.- Características específicas por cavidad y recomendaciones para su estabilización:

A) *Cavidad Alvaro Obregón.*- El material que conforma esta cavidad, está formado por bloques grandes cuya forma permite que se acúñen unos con otros siguiendo la tendencia de sus fracturamientos.

Se aprecia que las juntas entre bloques, presentan anchuras que van de los 10 cm a los 40 cm y cuyo acúñamiento entre bloques hace esperar un colapso súbito impredecible. La afectación de la cavidad a la vía pública es un peligro latente, no solamente para el tránsito vehicular, sino también para las instalaciones subterráneas de los servicios públicos municipales, en caso de que existan.

La más grave consecuencia de una falla súbita sería el colapso de las 6 viviendas asentadas en la zona de influencia de dicha cavidad.

Las recomendaciones para la estabilización de las cavidades detectadas quedan definidas cualitativa y cuantitativamente en los siguientes cuadros de conceptos, que a su vez son base del cálculo para evaluar los alcances económicos de cada uno de los trabajos a desarrollar.

COLONIA: 1o. de Septiembre.
CAVIDAD: Alvaro Obregón.

Volumen y alcance económico aproximado de los trabajos de estabilización.

CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD	P.U.	IMPORTE
1. Ampliación del acceso a la cavidad, incluye excavación y extracción del material.	m ³	15	27	405
2. Relleno con mortero fluido agua cemento bentonita y material granular.	m ³	670	227	152,090
3. Perforación rotatoria en diámetro de 4".	ml	20	145	2,900
4. Mampostería para formar dique en la entrada de la bocamina para contener mortero fluido.	m ³	24	70	1,680
SUMA :			N\$	157,075
IVA 10%:			N\$	15,708
TOTAL :			N\$	172,783

COLONIA: 1o. de Septiembre.
CAVIDAD: Javier Mina.

Volumen y alcance económico aproximado de los trabajos de estabilización.

CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD	P.U.	IMPORTE
1. Ampliación del acceso a la cavidad, incluye excavación y extracción del material.	m ³	74	27	1,998
2. Topografía subterránea con seccionamiento cada dos metros.	m ²	1,414.10	6	8,484.60
3. Reforzamiento perimetral de pilares y/o columnas a base de muros de tabique recocido, mampostería o block prefabricado, relleno con material granular el espacio anular entre columna y muro.	m ³	20	145	2,900
4. Movimiento de tierras de caídos para nivelar pisos y niveles de asiento de costalera aprovechando el mismo material.	m ³	42	70	2,940
5. Suministro y colocación de tierra para relleno de cavidades menores y/o sitios a compactar.	m ³	282	12	3,384
6. Afine de techos y muros.	m ³	130	230	29,900
7. Suministro y colocación de concreto H.O. de $f_c = 200 \text{ kg/cm}^2$ A.M. 3/4", de 5 cm de espesor lanzado sobre malla electrosoldada 6-10/10-10 previamente colocada dentro de las cavidades, incluye: elementos de fijación con varilla del No. 3 y 40 cm de longitud, el suministro de todos los materiales hasta el lugar de su colocación, los acarrees locales necesarios y todo lo necesario para su correcta ejecución (medio colocado).	m ³	3,621	25	90,525
8. Relleno de cavidades y nichos a base de costalera de rafi, incluye: afine de muros, relleno de costales, acarrees, apile e inyección con mezcla de arcilla, limo, arena, mortero y bentonita.	m ³	3,950	60	237,000
9. Arcos de concreto $f_c = 200 \text{ kg/cm}^2$ H.O. (lanzado), armado con 4 varillas del No. 2 a/c 20 cm, incluye: suministro de todos los materiales en el lugar de su colocación y todo lo necesario para su correcta ejecución.	ml	651	850	553,350
		36	400	14,400

continuación...

COLONIA: 1o. de Septiembre.
CAVIDAD: Javier Mina.

Volumen y alcance económico aproximado de los trabajos de estabilización.

CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD	P.U.	IMPORTE
10. Perforaciones hasta 4" Ø para inyección de mortero fluido.	ml	10	145	1,450
11. Pantalla de confinamiento de 2 cm de espesor.	m ²	24.30	850	20,655
12. Suministro y colocación de drenes de tubo PVC de ½" Ø y 1 m de profundidad, incluye: perforación, equipamiento y sello.	pza.	626	77	48,202
SUMA :			N\$	1'012,289.6
I VA 10% :			N\$	101,228.86
TOTAL :			N\$	1'113,517.4

COLONIA: 1o. de Septiembre.
CAVIDAD: Emiliano Zapata.

Volumen y alcance económico aproximado de los trabajos de estabilización.

CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD	P.U.	IMPORTE
1. Ampliación del acceso a la cavidad, incluye excavación y extracción del material.	m ²	30	27	810
2. Topografía subterránea con seccionamiento cada dos metros.	m ²	1,570	25	39,250
3. Movimiento de tierras de caldos para nivelar pisos y niveles de asiento de costalera aprovechando el mismo material.	m ³	158.06	12	1,896.72
4. Suministro y colocación de tierra para relleno de cavidades menores y/o sitios a compactar.	m ³	314	230	72,220
5. Afine de techos y muros.	m ²	3,037.80	25	75,945

continuación...

COLONIA: 1o. de Septiembre.
CAVIDAD: Emiliano Zapata.

Volumen y alcance económico aproximado de los trabajos de estabilización.

CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD	P.U.	IMPORTE
6. Suministro y colocación de concreto H.O. de $f_c = 200 \text{ kg/cm}^2$ A.M. 3/4", de 5 cm de espesor lanzado sobre malla electrosoldada 6-10/10-10 previamente colocada dentro de las cavidades, incluye: elementos de fijación con varilla del No. 3 y 40 cm de longitud, el suministro de todos los materiales hasta el lugar de su colocación, los acarrees locales necesarios y todo lo necesario para su correcta ejecución (medio colocado).	m ²	3,341.58	60	200,494.80
7. Relleno de cavidades y nichos a base de costalera de rafi, incluye: afine de muros, relleno de costales, acarrees, apile e inyección con mezcla de arcilla, limo, arena, mortero y bentonita.	m ³	343.60	850	292,060
8. Excavación para lumbreira de acceso sobre calle Hungría.	m ³	34	45	1,530
9. Colocación de drenes de 1/2" Ø y 1.0 m de profundidad con tubo PVC, incluye: perforación, equipamiento y sellado.	pza.	360	70	25,200

S U M A : N\$ 709,406.52

I V A : N\$ 70,940.65

T O T A L : N\$ 780,347.17