

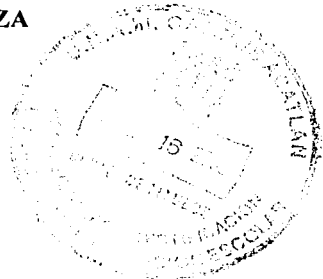
18



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS
PROFESIONALES "ACATLÁN"

PROGRAMA DE REDUCCIÓN DE RIESGOS EN
ZONAS MINADAS EN EL MUNICIPIO DE
ATIZAPÁN DE ZARAGOZA



TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL

PRESENTA

Angélica Garcilazo Galnares

ASESOR: Ing. Celso Barrera Chávez

Julio 2002



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Jurado:

Ing. Celso Barrera Chávez

Ing. Jorge Flores Núñez

Dr. José María Chávez Aguirre

Ing. Manuel Gómez Gutiérrez

Ing. Rubén Felipe Montes Trejo

1
A MI MADRE, BIOL. ANGÉLICA GALNARES CAMPOS,
POR SU APOYO Y EJEMPLO.

A LUIS M. ISLAS CORONEL,
POR SU PACIENCIA Y COMPRESIÓN.

A MIS HERMANOS, ALVARO, SANTIAGO Y ARTURO,
PORQUE SIEMPRE ESTUVIERON A MI LADO.

AL ING. CELSO BARRERA CHÁVEZ,
CON ESPECIAL AGRADECIMIENTO POR
SU VALIOSA ASESORÍA Y DIRECCIÓN.

AL ING. LUIS E. PÉREZ ORTIZ Y AL
H. AYUNTAMIENTO DE ATIZAPÁN DE ZARAGOZA
POR SU AYUDA Y APOYO INCONDICIONAL.

A TODAS AQUELLAS PERSONAS QUE DE ALGUNA FORMA
ME AUXILIARON, ORIENTARON Y DIERON APOYO.

INDICE

Página.

Introducción.....	1
Capítulo 1 Antecedentes, Exploración y Detección de zonas minadas.....	3
1.1 Zonificación y Estratigrafía del Subsuelo del Valle de México.....	4
1.2 Geología del Lugar.....	8
1.2.1 Formación Tarango.....	10
1.2.1.1 Contenido Litológico.....	13
1.2.1.2 Descripción Estratigráfica.....	15
1.2.2 Tectónica.....	18
1.2.3 Posición Estratigráfica.....	19
1.2.4 Los Abanicos de las Sierras Menores.....	19
1.2.5 Las Lomas.....	19
1.3 Materiales Puzolánicos.....	21
1.4 Métodos comúnmente utilizados en la detección y exploración de zonas minadas.....	22
1.4.1 Reconocimiento Superficial.....	23
1.4.2 Exploración de cavidades.....	24
1.4.2.1 Métodos Directos.....	25
1.4.2.2 Métodos Semidirectos.....	26
1.4.2.3 Métodos Indirectos.....	30
1.4.3 Conclusiones y Recomendaciones.....	51
1.5 Método utilizado en el Municipio de Atizapán de Zaragoza en la detección y exploración de zonas minadas.....	54
1.5.1 Radar de Gran Penetración (GPR).....	54
Capítulo 2 Estabilidad y Tratamiento de Zonas Minadas.....	73
2.1 Estabilidad de terrenos minados.....	73
2.1.1 Factores que afectan la estabilidad.....	73
2.1.2 Deformaciones inducidas por la explotación.....	74
2.1.3 Colapsos.....	77
2.1.4 Aspectos Teóricos.....	78

2.1.4.1	Consideraciones previas.....	78
2.1.4.2	Alcance de la Teoría.....	80
2.1.5	La migración de Cavidades.....	86
2.1.6	Influencia de Sismos.....	87
2.1.7	Resumen.....	90
2.2	Tratamiento de terrenos minados.....	91
2.2.1	Relleno e inyección de cavidades.....	91
2.2.1.1	Etapas del tratamiento.....	92
2.2.1.2	Aspectos Prácticos.....	95
2.2.1.3	Aspectos Económicos.....	96
2.2.2	Excavación y relleno compactado.....	97
2.2.2.1	Procedimientos constructivos.....	97
2.2.2.2	Rellenos sueltos y heterogéneos.....	100
2.2.2.3	Alternativas de excavaciones sin relleno.....	101
2.2.3	Refuerzo de bóvedas y protección contra el intemperismo.....	101
2.2.3.1	Formas de refuerzo.....	102
2.2.3.2	Recubrimiento con concreto lanzado.....	105
2.2.4	Cimentaciones profundas.....	106
2.2.5	Comentarios.....	108
2.3	Conclusiones y Recomendaciones Generales.....	110
2.3.1	Conclusiones.....	110
2.3.2	Recomendaciones.....	115
Capítulo 3 Procedimiento de Reducción de Riesgos.....		118
3.1	Antecedentes.....	118
3.1.1	Geología del Lugar.....	124
3.1.2	Estudios de Prospección Geofísica.....	127
3.2	Procedimiento de Reducción de Riesgos.....	128
3.3	Obras Preliminares.....	134
3.3.1	Determinación de la Trayectoria de la mina.....	134
3.3.	Obra Principal.....	138
3.4.1	Perforación y Exploración de la mina.....	138
3.4.2	Preparación de la mina.....	141
3.4.3	Instalación del equipo de inyección.....	143

3.4.4	Inyección del cemento puzolánico.....	144
3.4.	Trabajos Complementarios.....	148
3.5.1	Geofísica de confirmación.....	148
3.5.	Apoyos Adicionales.....	150
3.6.1	Reparación de fugas del Sistema de Agua Potable, Drenaje, Cisternas, Fosas sépticas, etc.....	150
3.6.2	Colocación de elementos de restricción al tránsito de todo tipo de vehículos en la zona afectada.....	151
Capítulo 4 Requerimientos Presupuestales y Aplicaciones.....		152
4.1.	Costo Unitario comercial del metro cúbico de mina tratada sin subsidios.....	152
4.2.	Costo Unitario del metro cúbico de mina tratada con subsidio.....	154
4.3.	Tabulador de aportaciones de la comunidad por concepto de incorporación al Programa.....	156
4.4	Tabulador de aportaciones por Servicio de Dictamen de no Riesgos por cavidad subterránea.....	158
4.5	Logros Alcanzados.....	159
Conclusiones.....		161
Bibliografía.....		162

INTRODUCCIÓN

El tratamiento de suelos minados es una actividad que cada día se vuelve más necesaria y sobre todo importante, en algunas zonas del Valle de México. En toda la zona de lomerío, especialmente en municipios como Atizapán de Zaragoza y Naucalpan de Juárez, se han explotado grandes cantidades de material, por lo que han quedado grandes extensiones de terreno con minas en el subsuelo. Debido al crecimiento de la población la Zona Metropolitana ha tenido que extenderse hacia estas zonas de alto riesgo, por lo que se ha hecho necesario el tratamiento de estos suelos minados. Debido a lo anterior, la información que se mostrará en esta Tesis es de sumo interés y sobre todo de actualidad, porque el crecimiento urbano es un factor que no va a cesar, sino al contrario cada día será más necesario ocupar estas zonas, y para poder habitarlas de manera segura, será necesario solucionar este problema.

Uno de los graves problemas que viven actualmente los Municipios de Atizapán de Zaragoza, Naucalpan de Juárez, Tlalnepantla de Baz y Villa Nicolás Romero en el Estado de México, es el referente a la existencia de cavidades en el subsuelo de su zona urbana, cavidades que fueron realizadas durante el siglo XIX y hasta bien entrado el siglo pasado con el objetivo de extraer materiales pétreos que demandaba el crecimiento de la ciudad.

Esta zona fue motivo de explotaciones controladas y no controladas dejando cavidades a cielo abierto y subterráneas en todas direcciones, siguiendo la orientación de los estratos que se pretendía explotar, en ese entonces las zonas donde se practicaron las excavaciones eran áreas deshabitadas. Con el paso de los años la mancha urbana se extiende y se crean asentamientos importantes en las zonas de las cavidades, trayendo como consecuencia un severo problema que hoy en día viven miles de familias al encontrarse sus viviendas afectadas, por la inestabilidad del subsuelo provocada por la explotación indiscriminada de los recursos naturales.

Las condiciones actuales de las cavidades son difíciles de predecir, ya que presentan problemas como un grado alto de intemperismo, inestabilidad en paredes, techos y

pilares; colapsos y migración hacia otros estratos o hacia la superficie, los cuales provocan colapsos en vialidades y casas habitación. Las zonas minadas actualmente existentes no están completamente identificadas debido a que no hay recursos económicos suficientes.

En esta Tesis se abordarán las zonas minadas ubicadas en el poniente del Valle de México, pero principalmente las que se localizan en el Municipio de Atizapán de Zaragoza, ya que los asentamientos humanos existentes, se encuentran en peligro debido a las condiciones prevalecientes en las cavidades subterráneas identificadas hasta el momento.

Por lo tanto el objetivo 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 el más factible atendiendo a las condiciones de la cavidad y del sitio donde se ubica.

El tema está estructurado en 4 capítulos, en el primero se expone la geología y estratigrafía de la zona así como los métodos comúnmente utilizados en la detección y exploración de zonas minadas. En el segundo se proporciona información sobre los problemas de estabilidad, los factores que la afectan, colapsos, migración de cavidades e influencia de sismos; así como los procesos para efectuar el tratamiento de zonas minadas. Entre los principales métodos de tratamiento que se expondrán figuran el relleno e inyección de cavidades, excavación y relleno compactado, refuerzo de techos y protección contra intemperismo y cimentaciones profundas.

Finalmente, en los capítulos 3 y 4 se describen los procesos constructivos empleados en el Municipio de Atizapán de Zaragoza para la reducción de riesgos en zonas minadas, y se muestra un análisis de costos por metro cúbico de relleno el cual puede servir de referencia para algún trabajo similar, así como los resultados obtenidos.

PROGRAMA DE REDUCCIÓN DE RIESGOS EN ZONAS MINADAS EN EL MUNICIPIO DE ATIZAPÁN DE ZARAGOZA

CAPÍTULO 1

ANTECEDENTES, EXPLORACIÓN Y DETECCIÓN DE ZONAS MINADAS

La explotación desmedida de materiales para la construcción y edificación de la Ciudad de México, hecha por el hombre sin control ni previsión alguna y sin responsabilidad, se rewertió sobre él mismo. Esto es un ejemplo muy claro de la forma en que el hombre altera o contamina el medio ambiente en que vive y de las consecuentes repercusiones en la Ingeniería Geotécnica.

La ocupación de las áreas minadas, errática en todos sentidos, incluyendo fraccionamientos residenciales y asentamientos humanos irregulares, subestimó o pasó inadvertida por ignorancia o intencionalmente, la presencia de cavidades en el subsuelo, de forma tal que en el presente constituyen un grave peligro en potencia que tiende a acentuarse con el tiempo, dada la influencia por ejemplo, del intemperismo, de la acción del mismo hombre que erige sobre ellas y modifica al terreno, y de otros agentes. Las consecuencias se vienen manifestando por el gran número de fallas de techos de minas, causando daños materiales y pérdidas de vida, con incidencia comparable o mayor que las producidas por otros fenómenos.

El problema se agrava aún más debido a que en la actualidad buena parte de las áreas minadas se encuentran pobladas, y a que su estudio y solución requieren de acciones inmediatas que además de complejas son muy costosas. Se ha intentado poner remedio, unas veces con éxito y otras de modo deficiente, debido a que la soluciones han sido ingenierilmente inapropiadas.

A fines del siglo pasado se explotaban los materiales para construcción con auxilio de herramientas manuales y por métodos rudimentarios, ya que no se conocía aún el

equipo pesado que ahora se utiliza. Las razones anteriores obligaban a realizar túneles de explotación en los lomeríos del poniente de la Ciudad de México, precisamente en materiales de la zona que ahora se conoce como Formación Tarango. De estos túneles se extraía pómez que en aquel tiempo se denominaba alegría o tepetate ligero.

Por lo fácil que era explotar ese material y la fuerte demanda que de él había para el tipo de construcción de esa época, el número de explotaciones a base de túneles aumentó en gran forma, originándose así un verdadero enjambre de túneles en el subsuelo, que si bien entonces no resultaban peligrosos, en la actualidad lo son en gran forma, a causa del intemperismo que han sufrido.

1.1) Zonificación y Estratigrafía del Subsuelo del Valle de México

El Valle de México es una unidad geográfica limitada al norte por las Sierras de Tepotzotlán, Tezontlapan y Pachuca; al oriente por los llanos de Apan, los montes de río Frio y la Sierra Nevada; al sur por las Sierras de Cuauhtzin y Ajusco y al poniente por las Sierras de las Cruces, Monte Alto y Monte Bajo. La superficie total del Valle es del orden de 7,160 km², de los cuales 3,080 km² corresponden a zona francamente montañosa y 2,050 km² a zonas bajas bien definidas. La altura sobre el nivel del mar en la parte más baja es de 2,240 m, aproximadamente.

En la actualidad, además del tajo de Nochistongo, abierto en 1789, el Valle cuenta con dos túneles en Tequisquiác, que lo comunican con la cuenca del río Moctezuma.

Dentro del Valle de México está ubicado el Distrito Federal, cabecera política de la República Mexicana, el cual incluye a la Ciudad de México y ocupan un total de 1,480 km², de los cuales unos 500 km² son zona urbanizada. Una buena parte de la Ciudad de México se encuentra construida sobre el fondo del ex lago de Texcoco y a este hecho se deben los problemas de cimentación que en la Ciudad se presentan.

Todo el Valle de México se caracteriza en general por la muy intensa actividad volcánica que tuvo lugar en el pasado, de la cual quedan aún vestigios en forma de un

gran número de volcanes apagados, el Popocatepetl aún activo y abundantes materiales de aquel origen. Los depósitos más finos que aparecen en el subsuelo de la Ciudad de México corresponden, según hoy se admite, al mismo origen volcánico.

Los numerosos estudios que se han realizado hasta hoy en relación con el subsuelo del Valle de México han permitido a Marsal y Mazari (1959) zonificar la Ciudad de México en tres áreas, atendiendo a un punto de vista estratigráfico.

La primera corresponde a la zona llamada de las Lomas por desarrollarse en parte en las últimas estribaciones de la Sierra de las Cruces y está constituida por terrenos compactos, areno – limosos, con alto contenido de gravas unas veces y con tobas pumíticas bien cementadas otras; por algunas partes esta zona invade los derrames basálticos del Pedregal. En general, la zona de las Lomas presenta buenas condiciones para la cimentación de estructuras, la capacidad de carga del terreno es alta y no hay formaciones compresibles capaces de asentarse mucho. Sin embargo debido a la explotación de minas de arena y grava, muchos predios pueden estar cruzados por galerías de desarrollo muy errático. Muchas de estas galerías pueden estar actualmente rellenas de material arenoso suelto, lo cual, sin disminuir en mucho su peligrosidad, hace muy difícil su localización. Cuando las zapatas de cimentación quedan asentadas en estas zonas falsas se producen asentamientos diferenciales fuertes entre columnas, lo cual ha sido fuente de problemas. Análogamente, en la zona del Pedregal en la que aparece una fuerte costra de derrames basálticos, pueden desarrollarse cuevas o aglomeraciones de material suelto fragmentado que podrían ser causa de fallas bajo columnas pesadas. Esta es la razón citada por Marsal y Mazari para explicar por qué las estructuras pesadas de la Ciudad Universitaria se erigieron evitando las áreas invadidas por las lavas derramadas antaño por el volcán Xitli. De otra manera, los costos de inyección de cemento para estabilización del suelo pueden resultar altos. Otro problema que se presenta en la parte norte de la Ciudad de México, dentro de la zona general de las Lomas es la presencia de depósitos eólicos de arena fina y uniforme, estas formaciones son susceptibles de producir asentamientos diferenciales bruscos y erráticos y exigen estudios importantes para elegir el tipo de cimentación más conveniente o el método más eficaz de compactación artificial.

Entre las serranías del poniente y el fondo del lago de Texcoco se presenta una Zona de Transición, en donde las condiciones del subsuelo desde el punto de vista estratigráfico varían muchísimo de un punto a otro. En general aparecen depósitos superficiales arcillosos o limosos, orgánicos, cubriendo arcillas provenientes de rocas volcánicas, muy compresibles que se presentan en espesores variables, con intercalaciones de arenas limosas o limpias, compactas, todo el conjunto sobreyace sobre mantos potentes, predominantemente de arena y grava. Los problemas de capacidad de carga y de asentamientos diferenciales pueden ser críticos, sobre todo en construcciones extensas sujetas a condiciones de carga dispares, esto es frecuente en construcciones industriales, por otra parte abundantes en esta zona. Como consecuencia, el ingeniero ha de investigar cuidadosamente el conjunto de propiedades de los materiales que constituyan el subsuelo de la obra de que se trate.

Además de la anterior Zona de Transición existe en la Ciudad de México la Zona del Lago, así llamada por corresponder a los terrenos que constituyeron el antiguo lago de Texcoco. Un corte estratigráfico típico en esta zona exhibe los siguientes estratos:

- a) Depósitos arena – arcillosos o limosos o rellenos artificiales de hasta 10 m de espesor.
- b) Arcillas de origen volcánico, altamente compresibles, con intercalaciones de arena en pequeñas capas o en lentes.
- c) La primera capa dura, de unos 3 m de espesor, constituida por materiales arcillo – arenosos o limo – arcillosos muy compactos. Esta capa suele localizarse a una profundidad del orden de 33 m.
- d) Arcillas provenientes de rocas volcánicas de características semejantes a las de b) aunque de estructuración más cerrada. El espesor de este manto oscila entre 4 y 14 m.
- e) Estratos alternados de arena con grava y limo o arcilla arenosa.

En algunos lugares, a partir de los 65 m, se ha encontrado un tercer manto arcilloso compresible.

En la figura siguiente (Fig. 1.1) se muestra la zona de los lomeríos del poniente de la Ciudad de México, en donde existen probabilidades de encontrar cavidades subterráneas producto de antiguas explotaciones.

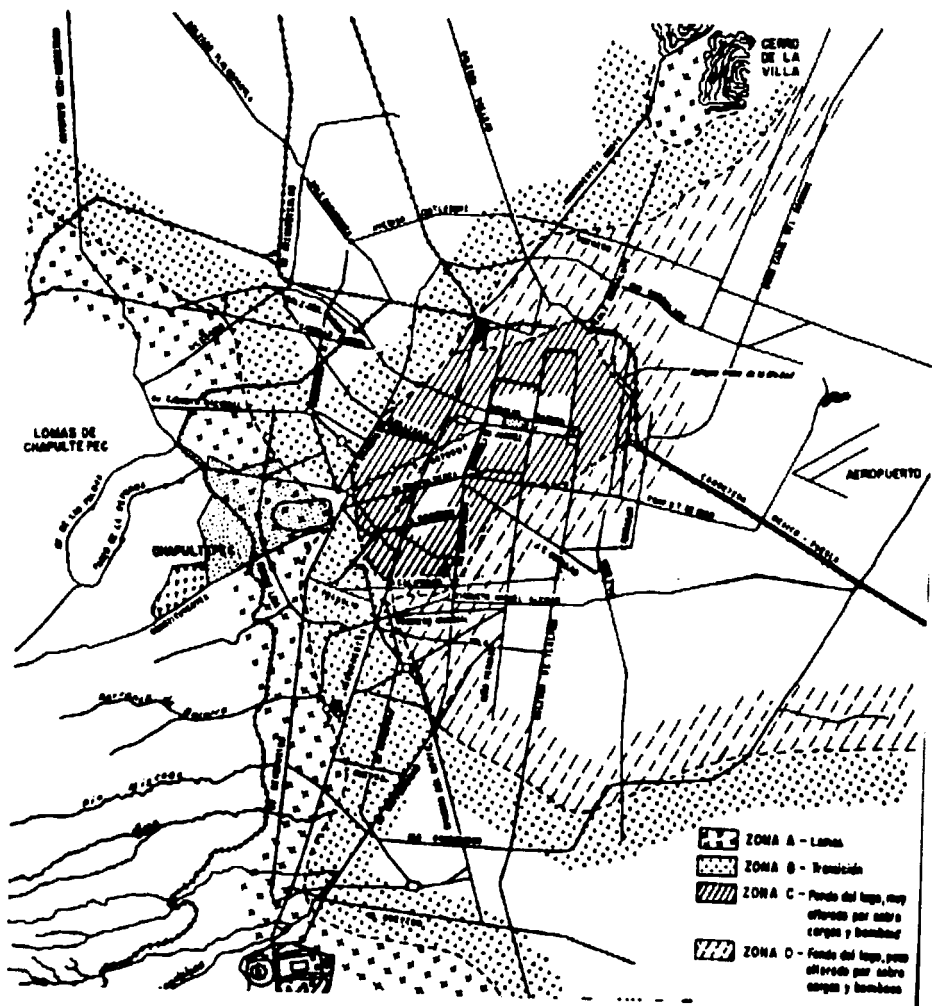


Figura 1.1 Zonificación de la Ciudad de México.

Es bien conocido que las zonas minadas se extienden hacia los lomeríos del Estado de México, en donde se encuentran colonias tales como Tecamachalco, La Herradura, Bulevares, Lomas Verdes, Condado de Sayavedra, Las Alamedas, con problemas similares a los de la Ciudad. La falta de información suficiente no permite por ahora establecer con certeza una zonificación del conjunto.

Las zonas minadas alcanzan también al Estado de Hidalgo, y puede anotarse que en las cercanías de Tepeji del Río, así como en algunos sitios del Estado de México, aún se efectúan explotaciones subterráneas.

1.2) Geología del Lugar

Las lomas que se elevan al oeste de la Ciudad de México 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. Como tal actividad se desarrolló a partir de fines del Mioceno y se extendió hasta aproximadamente mediados del Plioceno, los citados abanicos volcánicos contienen productos de esta misma edad. Midiendo en la escala absoluta de años, lo anterior abarca entre 10 y 5 millones de años antes del presente. Por lo tanto, las lomas se formaron principalmente en el Plioceno Inferior, dentro de un lapso de unos 5 millones de años.

Al contemplar la Cuenca de México (Fig. 1.2) resalta su estructura casi simétrica respecto a un eje NNW – SSE: a las lomas que se extienden al pie de las sierras elevadas en el poniente, corresponden aquellas que se desarrollan al pie de las sierras en el oriente. Por consiguiente, pueden describirse las lomas que se elevan a ambos lados de la extensa planicie lacustre de la Cuenca de México, como los depósitos piroclásticos acumulados a los pies de las Sierras Mayores: Sierras de las Cruces, Nevada y Río Frio.

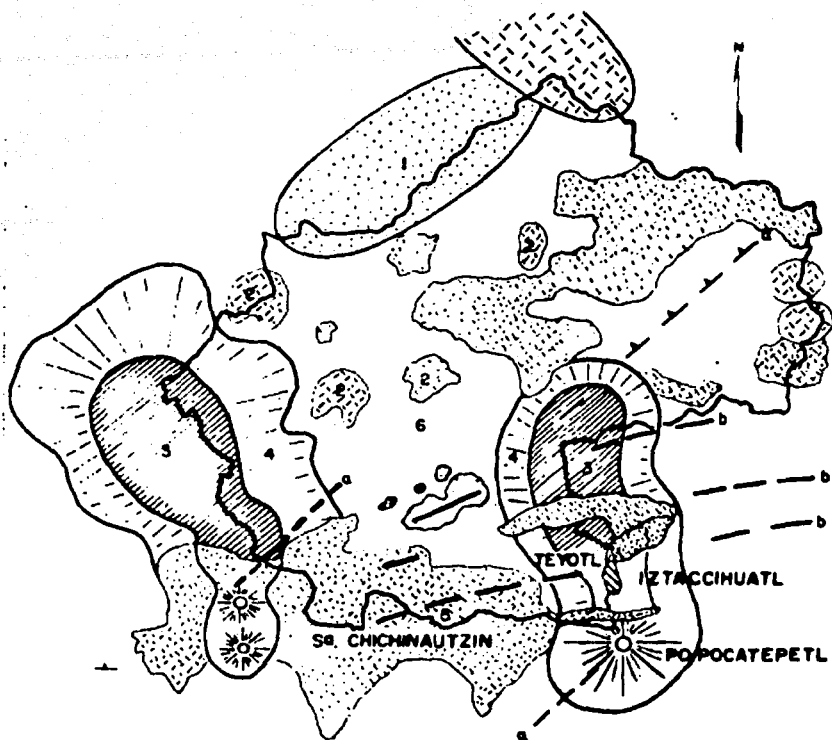


Figura 1.2

La cuenca de México, sus formaciones y fracturamientos tectónicos.

1) Sierra de Tezontlalpan; 2) Sierras Menores; 3) Sierras Mayores; 4) Formación Tarango; 5) Formación Chichinautzin; 6) Relleno aluvial; a) Fracturamiento al NE, del Terciario Superior; b) Fracturamiento en arco del tipo Santa Catarina, del Plio - Pleistoceno.

La zona se encuentra conformada por materiales piroclásticos de composición principalmente andesítica a riolítica, característicos de la Formación Tarango. En la porción superior se asienta un horizonte tobáceo de grano fino a medio, con un espesor que varía entre 5 y 25 metros y que descansa sobre una capa de arenas pumíticas con algún contenido de mica negra.

Toda esta secuencia se encuentra generalmente semiconsolidada. El horizonte arenáceo se puede determinar por correlación con otras áreas similares de la región, y es posible asumirle un espesor variable entre 3 y 6 metros.

El horizonte pumítico fue explotado siguiendo su echado natural que en principio se estima en no más de 15 grados en algunas zonas y hasta de 25 grados en otra. Lo anterior dio lugar a la conformación de cavidades con geometría irregular en túneles sin dirección específica. Se extrapola de otras zonas, una dimensión seccional de los túneles de 2 por 2 metros en ciertas regiones hasta 4 por 6 en otras con posibles claros de mayores dimensiones en el cruce de dos o más de ellos.

Se debe aclarar en este punto que actualmente no es posible observar las bocaminas ni la trayectoria de todos los túneles en todas las zonas, en virtud de que los habitantes han cubierto y rellenado todo indicio de falla y en algunos casos, por miedo a ser desalojados, tienden a esconder las evidencias.

1.2.1) Formación Tarango

En 1948 los depósitos de las Lomas se estudiaron por primera vez con cierto detalle. En ese año se definió la Formación Tarango, basándose en materiales que procedían precisamente de la Barranca de Tarango al oeste de la Ciudad de México, donde existían las clásicas minas de "arena azul" en explotación, que ofrecían buenos cortes. Aquí fue descrito el afloramiento típico con división en tres formaciones. (Figura 1.3)

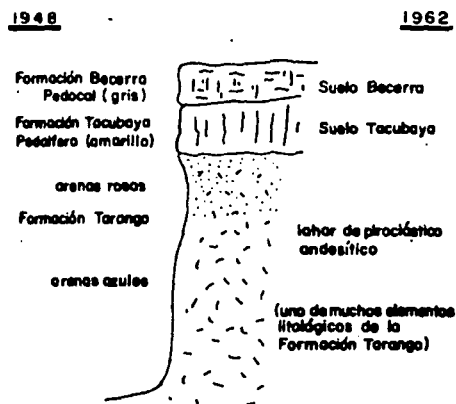


Figura 1.3 La Formación Tarango y suelos Tacubaya y Becerra superpuestos.

En los años subsecuentes la división del afloramiento típico en tres unidades estratigráficas se modificó, simplificándola. El conjunto del afloramiento se interpretó posteriormente como parte de la Formación Tarango, la cual representa la suma de los productos piroclásticos de las Sierras Mayores depositados a los pies de ellas. 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 condiciones climáticas tal vez del Cuaternario. Así el color gris de un horizonte de suelo fósil tobáceo, conteniendo capas de caliche, se interpreta en la actualidad como representativo de un clima tendiente a árido (Meteorización Becerra). El color amarillento de otro horizonte tobáceo alterado en general subyacente al anterior, se interpreta como consecuencia de un clima más bien húmedo (Meteorización Tacubaya).

Estratigráficamente la Formación Tarango es correlacionable con la Serie Nochistongo y a su vez con 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). Hacia la Cuenca de México, la Formación Tarango se encuentra cubierta por los depósitos lacustres y aluviales del Cuaternario.

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 son producto de erupciones por lo general violentas, emitidas por las chimeneas de grandes volcanes andesíticos estratificados.

Por su posición estratigráfica y por estudios palinológicos y paleontológicos, efectuados por Fries (1962), se asigna una posición cronoestratigráfica Plioceno Superior - Cuaternario Inferior (Fig. 1.4). Se sabe que el contenido fósil de la Formación Tarango consiste de flora, moluscos y algunos molares de mastodonte y de

caballo encontrados por Villarelo y Bose en la Mina Transversal, cercana al poblado de Atonilco el Grande, Hgo.

ESTRATIGRAFIA DE LA CUENCA DE MEXICO

SISTEMA	SERIE	PORCION SUR F. MOGSEN Y OTROS	POZO TEXCOCO-2 IMP-DUIEDO (1970)⊕	PORCION NORTE GASCA Y DEYES (1977)	
CUATERNARIO	HOLOCENO	LACUSTRE ALUVION FM. SECERRA FINA. DEL POZO, NITEL.	SEDIMENTOS LACUSTRES ARCILLOSOS FM. SECERRA	SEDIMENTOS LACUSTRES ALUVION FM. SECERRA	
	PLEISTOCENO	GRUPO CHICHINAUTZIN Bb., Abc. y R. modiolina. CEMIZAS DERRAMES FM. TARANGO	TARANGO CALIZAS LACUSTRES ARCILLAS TONAS Y CLASIFICOS IRREGULARES	TARANGO MIEMBRO TOBACCO MIEMBRO ARCILLOSO MIEMBRO TOBACCO	
Terciario	PLIOCENO	LAS CRUCES IZTACCHUATL AJJISCO	DERRAMES Y TONAS ANOMALICAS	CHIMQUINITE	
	MIOCENO	IXCHITEPEC	EQUIVALENTE A TEPOZTLAN	GUADALUPE	
	OLIGOCENO	GRUPO TEPOZTLALPAN	EQUIVALENTE A	ANHIDRITA TEXCOCO	
				CONGLOMERADO TEXCOCO (BALSAS)?	
	EOCENO				
	PALEOCENO				
CRETACICO	SUP.	FM. SOYATAL ?	SEDIMENTOS CRETACICOS	FM. SOYATAL (?)	
			⊕ PROF. TOTAL-2065 M.		

Figura 1.4 Estratigrafía de la Cuenca de México (Según E. López Ramos /1978)

1.2.1.1) Contenido Litológico

La Formación Tarango representa un conjunto estratificado a veces regular, a veces irregular y hasta lenticular, ligeramente inclinado (4°), compuesto de los seis siguientes elementos litológicos:

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

Todos los elementos, con excepción de los suelos, son producto de erupciones por lo general violentas, emitidas por las chimeneas de grandes volcanes andesíticos estratificados. Según la actividad del aparato individual y según el magma contenido en él, las erupciones producen cenizas, pómez, brechas, avalanchas ardientes o lavas. Las lavas descienden fluyendo lentamente por los flancos del cono; en forma eventual pueden avanzar por las barrancas algunos centenares de metros a partir del cráter. Por lo contrario, las brechas y cenizas producidas por las explosiones más violentas, se dispersan a mayores distancias del cráter siendo a veces arrastradas por los vientos a decenas de kilómetros de distancia. 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.

Es interesante la formación de dos tipos litológicos especiales: lahares y avalanchas ardientes, 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 las

barrancas erosionadas en los abanicos volcánicos y forman los depósitos de arenas y gravas azules tan conocidas en las Lomas.

Más extraordinaria que la formación de lahares es la de avalanchas ardientes, aunque se producen con poca frecuencia. 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. Son ignimbritas ligeramente soldadas.

La vida de un volcán estratificado como los que componen la Sierra de las Cruces se extiende a través de decenas de milenios al igual que el Popocatépetl, que puede considerarse como activo. Erupciones ocurren cada 30, 50, 70 o más años. Después de una erupción violenta que dura algunas semanas o cuando mucho uno o dos meses, se interpone un período de descanso más o menos prolongado. Es entonces que se pueden producir los fenómenos de meteorización y alteración de los estratos de cenizas volcánicas superficiales; así principia la formación de suelos que pueden llegar a la madurez, si entre una erupción paroxísmica y otra se interpone un intervalo de milenios.

La Formación Tarango alcanza espesores de 300 a 400m. Termina cada abanico volcánico en una superficie estructural propia, que marca el fin de la actividad volcánica que produjo. Al estudiar la estructura de la Formación Tarango es posible reconocer que ésta se compone de la superposición de varios abanicos volcánicos, cada uno terminando con su superficie estructural. Por lo general cada abanico corresponde a la vida activa de un volcán. Cuando éste se apaga surge otro volcán, el cual produce su propio abanico volcánico que se sobrepone al anterior. Así resulta que la Formación Tarango se compone de numerosos abanicos volcánicos superpuestos o entrelazados, según la secuencia o contemporaneidad de las erupciones de distintos volcanes. (Fig. 1.5).

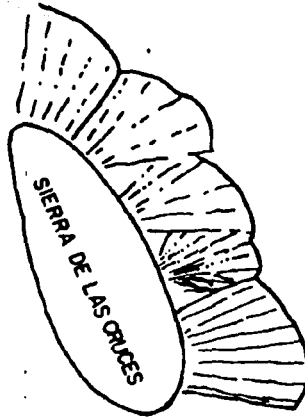


Figura 1.5 La Formación Tarango está formada de varios abanicos volcánicos superpuestos y entrelazados.

1.2.1.2) Descripción Estratigráfica

Los depósitos ígneos observan una pseudoestratigrafía que, a pesar de su origen, presenta una continuidad y homogeneidad notables, solo en algunos casos no corresponde con los afloramientos litológicos, por causa de la erosión.

1.2.1.2.1) Suelos Totolsingo (S-To)

Tienen gran contenido de materia orgánica color oscuro, son recientes y de espesor variable.

1.2.1.2.2) Suelos Tacubaya y Becerra (S-Ta)

Subyacen a los suelos Totolsingo, son interpretados como horizontes tobáceos, que fueron erosionados, redepositados en hondonadas y sometidos a distintos grados de meteorización. El color es café claro con capas de caliche, de espesor variable, se localizan en las partes altas de las lomas.

1.2.1.2.3) Lahares (Lh)

Se localizan infrayaciendo a los suelos Tacubaya y Becerra, son aglomerados ígneo-sedimentarios bien compactados, conformados por clastos de composición andesítica, de color gris oscuro con tamaños desde la arena hasta boleos y bloques. Esta unidad ha sido explotada con minas a cielo abierto para obtención de gravas y arenas azules (andesíticas) y en la antigüedad su explotación fue subterránea.

1.2.1.2.4) Aglomerados Dacíticos (Ag-D)

Se localizan bajo los lahares. Se definen como aglomerados ígneos con clastos de composición dacítica. Se consideran aglomerados volcánicos aluviales o poco transportados de su lugar de origen.

1.2.1.2.5) Toba Arcillosa con clastos Dacíticos (Ar - D)

Se encuentran bajo los aglomerados dacíticos, son de color café oscuro, con escasos clastos, con espesor de 0.7 metros aproximadamente.

1.2.1.2.6) Arena Pumítica de Grano Grueso (Ap - G)

Subyace a la toba arcillosa con clastos dacíticos, contiene partículas redondeadas de color blanco y al intemperismo café o crema. En algunos afloramientos se detectó una matriz arcillosa, que provocó la suspensión de su explotación en minas subterráneas, ya que este horizonte fue explotado. Otra característica que provocó el poco desarrollo de las cavidades fue su espesor de 1.5 a 1.0 metros.

1.2.1.2.7) Toba Arcillosa con Clastos Pumíticos (Ar - P)

Se encuentra bajo la arena pumítica de grano grueso, es de color café con un espesor de 1.5 metros y presenta clastos pumíticos.

1.2.1.2.8) Arena Pumítica de Grano Medio (Ar - M)

Subyace a la toba arcillosa con clastos pumíticos, está constituida por arena pumítica, con espesor de 2.0 a 2.5 metros que permitió la explotación únicamente del horizonte de interés bajo una altura cómoda de mina subterránea. Estos factores

provocaron que este horizonte fuera mayormente explotado comprendiendo el 70% de las minas subterráneas.

1.2.1.2.9) Toba Areno Limosa (TO)

Se encuentra bajo la arena pumítica de grano medio, es de color café claro, con clastos como pumitas, dacitas y andesitas. Con un espesor de 1.5 a 2 metros.

1.2.1.2.10) Arena Pumítica con Arcilla (Ap – Ar)

Se localiza subyaciendo a la toba areno limosa, tiene un espesor de 1 a 2 metros, contiene arenas pumíticas regularmente clasificadas.

1.2.1.2.11) Toba Areno Limosa (To)

Se encuentra subyaciendo a la arena pumítica con arcilla, presenta mayor cantidad de clastos andesíticos dacíticos; su composición es más ácida con un espesor de 1 metro.

1.2.1.2.12) Aglomerado volcánico (Ag – V)

Está formado por aglomerados ígneos bien compactados con clastos subangulosos, rocas ígneas extrusivas como andesitas, dacitas y riodacitas. Con un espesor de 20 metros.

La Formación Tarango se divide en superior e inferior, se tomo como división la toba areno limosa como primer estrato de la parte inferior. Al observar los cortes de la Formación Tarango, se observa la ausencia de flora fósil, esto se debe a que los depósitos se formaron en el Plioceno, tiempo caracterizado por su clima árido. Otra causa de este fenómeno fueron las constantes erupciones, lo que impedía el crecimiento de vegetación.

Nota: la clasificación para los tipos de suelo, es propuesta, para que sea más fácil su identificación en la tabla que se muestra.

Tabla 1 Clasificación de los suelos pertenecientes a la Formación Tarango

Espesor Promedio (m)	Simbología	Descripción
Variable	S-To	Suelos Totolisingo, color oscuro con alto contenido de materia orgánica.
Variable	S-Ta	Suelos Tacubaya, color café claro con bandas de cálice
0.50	Ap - G - Ar	Arena pumítica de grano grueso muy arcillosa e intemperizada.
Variable	A - Ta	Estos suelos son residuales de tobas areno arcillosas
2.50 - 10.00	Lh	Lahares compuestos por aglomerados bien compactados de clastos andesíticos principalmente, subangulosos, emplazados en una matriz muy escasa. Sin embargo en las inmediaciones de los aparatos volcánicos estos depósitos presentan una matriz arenosa, su color es gris oscuro mal clasificado, presentando arena gruesa, boleos y bloques.
10.00	Ag - D	Aglomerados de clastos generalmente subangulosos de composición dacítica, emplazados en una matriz areno limosa de la misma composición.
0.70	Ar - D	Toba arcillo limosa color café oscuro, compacta con clastos dacíticos.
1.50	Ap - G	Arena pumítica de grano grueso color café claro muy disgregable de compacidad baja y solo en su base presenta matriz arcillosa.
1.50	Ar - P	Toba arcillo limosa color café oscuro, bien compacta con clastos pumíticos y fósiles.
2.50	Ap - M	Arena pumítica de grano medio bien clasificada y disgregable con lineaciones de arcilla, sin matriz y un espesor muy constante.
1.50	To	Toba areno limosa mal clasificada color café claro compacta con clastos de pumitas.
1.30	Ap - Ar	Arena pumítica ligeramente compacta con matriz arcillosa, regularmente clasificada de grano medio y grueso.
15.00	To	Toba areno limosa mal clasificada con clastos de andesitas, dacitas, la composición de la matriz es ácida, color rosáceo.
1.00	Ag - Inf	Arena pumítica mal clasificada contaminada de arcilla, con intercalaciones de tobas rosadas.
20.00	Ag - V	Aglomerados volcánicos mal clasificados con clastos subangulosos y subredondeados de composición volcánica variable y bien compactados.

1.2.2) Tectónica

En el Mioceno Superior la Cuenca de México sufrió un tectonismo en bloques a lo largo de fracturas dirigidas al NW. Este tectonismo fue sustituido en el Plioceno por otro que se desarrolló a lo largo de fracturas dirigidas al NE, creando un impresionante conjunto de fosas y pilares. Este último tectonismo que rigió la actividad volcánica de las Sierras Mayores, afectó al mismo tiempo los depósitos de los abanicos volcánicos Tarango, fracturándolos y fallándolos principalmente al NE. La mayoría de las barrancas que surcan las lomas mantienen esta dirección, dictada por tectonismo.

1.2.3) Posición Estratigráfica

La Formación Tarango (fig. 1.6) está interestratificada con las series lávicas de las Sierras Mayores (Sierra de las Cruces) donde se originó. Sobreyacen los abanicos volcánicos Tarango a los depósitos volcánicos del Terciario Medio (Formación Xochitepec) y del Mioceno Superior (Sierras menores: Sierra de Guadalupe y Tepotzotlán). Sin embargo, subyace a los depósitos clásticos aluviales y aluviales del Cuaternario.

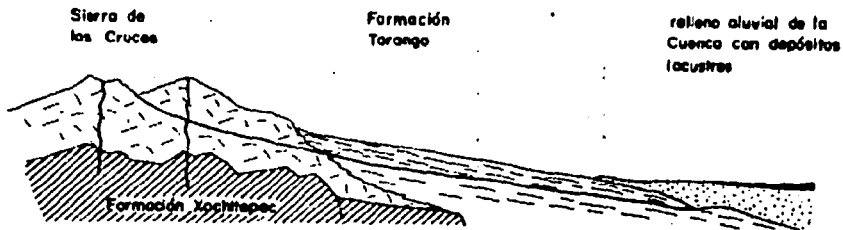


Figura 1.6 Sección W-E mostrando la posición de la Formación Tarango respecto a formaciones anteriores y posteriores.

1.2.4) Los Abanicos de las Sierras Menores

Mientras que la Formación Tarango contiene en forma de grandes abanicos todos los elementos piroclásticos derivados de las erupciones de las Sierras Mayores, a los pies de las Sierras menores se acumulan cenizas y pómez caídas en forma de lluvia. Así resulta por ejemplo que la Sierra de Guadalupe contenga sobre sus flancos, en forma de abanicos pequeños, numerosos horizontes de tobas y capas de pómez provenientes de erupciones de la Sierra de las Cruces, lo que no hay aquí son lahares e ignimbritas pues éstas solo fluyen por barrancas al pie de las Sierras Mayores.

1.2.5) Las Lomas

Al oeste de la Ciudad de México se elevan las lomas, que constituyen el producto de las erupciones piroclásticas originadas en el volcán complejo del Cerro de San Miguel.

Este volcán se edificó a través de distintos ciclos de erupciones, se desprende de su morfología compleja, pero también es posible demostrarlo estudiando la superposición de los distintos elementos integrantes de su abanico volcánico correspondiente.

Así, en este abanico, ha sido posible subdividir en dos a la Formación Tarango, que se extiende desde San Angel, al sur, hasta la Barranca del Río Hondo hacia el norte. La Tarango Inferior representa la acumulación de piroclásticos esencialmente cineríticos y pumíticos, aunque contiene también algunos lahares con fragmentos andesíticos. Todo forma un abanico potente, que sufrió durante un período prolongado tectonismo y erosión cortándose, por consiguiente, barrancas profundas dirigidas al NE en su cuerpo. Subsecuentemente, en un período final de actividad renovada, ligada a la formación de una gran caldera, se produjeron magnas erupciones de pómez y piroclásticos de andesita azul.

Las capas de pómez cubrieron una topografía ondulada sobre grandes distancias; los piroclásticos rellenaron las barrancas profundas, sobre todo la de Santa Fe, con lahares potentes que hoy constituyen Las Minas de Arenas Azules. (fig. 1.7). Estos depósitos finales se definieron como Tarango Superior.

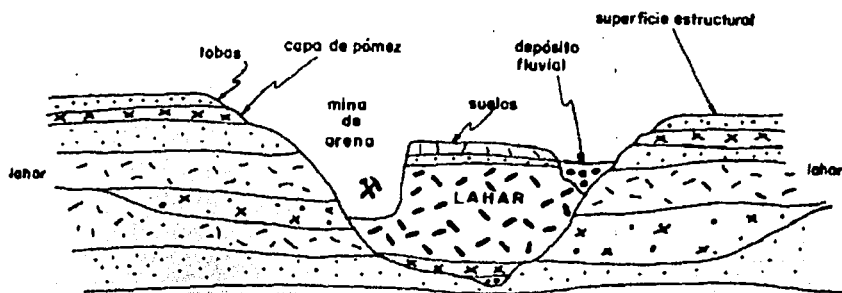


Figura 1.7 Barranca erosionada en la Formación Tarango y rellena por un lahar de "arenas azules" del tipo Santa Fe.

1.3) Materiales Puzolánicos

Una puzolana es un material silíceo o aluminosilíceo que por sí mismo posee poco o ningún valor cementante pero que, en forma finamente molida y en presencia de agua, reacciona químicamente con el hidróxido de calcio liberado por la hidratación del cemento Portland para formar compuestos que poseen propiedades cementantes.

Como puzolanas se emplean un gran número de materiales naturales: las tierras diatomáceas, los horstemos opalinos, las arcillas, las pizarras, las tobas volcánicas y la piedra pómez. La mayoría de las puzolanas naturales se deben moler antes de ser usadas y muchas se tienen que calcinar a temperaturas de 650 °C a 980 °C, para activar sus componentes arcillosos. Estos materiales se clasifican según la norma ASTM C 618 como puzolanas Clase N.

Las puzolanas también incluyen a la ceniza volante y al humo de sílice. La mayor parte de las partículas en la ceniza volante son esferas sólidas y algunas otras son cenósferas huecas. También se encuentran presentes plerósferas, que son esferas que contienen a otras esferas de menor tamaño. La ceniza volante consiste principalmente de silicatos vítreos que contienen sílice, alúmina, hierro y calcio. Otros componentes menores son el magnesio, el azufre, el sodio, el potasio, y el carbono.

El humo de sílice, al que también se le conoce como microsílíce o humo de sílice condensado, es otro material que se emplea como aditivo puzolánico. Este producto en forma de polvo de color gris claro a oscuro o en ocasiones gris azulado verdoso, es resultado de la reducción de cuarzo muy puro con carbón mineral en un horno de arco eléctrico durante la manufactura del silicio o de aleaciones de ferrosilicio. El humo de sílice condensado esencialmente consiste en dióxido de sílice en forma no cristalina. Puesto que es un material susceptible de ser conducido por el aire como la ceniza volante, tiene forma esférica. Es extremadamente fino, con partículas con diámetros menores de una micra y con un diámetro promedio de 0.1 micra.

1.4) Métodos Comúnmente utilizados en la detección y exploración de zonas minadas

Antes de pasar al detalle de los métodos de exploración de cavidades, es importante resumir el origen y naturaleza de las que en particular interesan en este estudio, pues es a partir de su conocimiento que se podrá orientar su búsqueda. Tratándose de las cavidades alojadas en las formaciones volcánicas del poniente de la Ciudad, se puede decir que:

- a) Todas son de origen artificial, excavadas por el hombre, por lo que sus dimensiones originales debían permitirle su acceso, es decir, del orden de 1.5 a 2.0 m tanto en altura como anchura; las cavidades debieron tener siempre una entrada o boca en la superficie y desarrollo continuo a partir de ella.
- b) Usualmente las minas arrancan de barrancas o cortes, en cuyas laderas el hombre pudo reconocer aquellos mantos o lentes de materiales útiles para la construcción, tales como grava, arena y pómez, cuyas características hacían factible su empleo más o menos directo, sin recurrir a procesos elaborados de trituración o selección.
- c) 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, pudiendo estar las galerías alojadas en un mismo manto, o en varios situados a diferentes niveles. Donde los materiales eran particularmente aptos para su explotación, se llegaron a excavar salones de grandes dimensiones horizontales que podían salvar claros 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.
- d) Con el tiempo los materiales de las bóvedas suelen alterarse y debilitarse, produciéndose derrumbes que más tarde pueden ser arrastrados por agua infiltrada, por lo que una o varias porciones de las minas pueden estar parcial o totalmente rellenas con estos derrumbes y sedimentos.

La importancia de la investigación de las minas es evidente si se considera que, una vez que se localizan y definen, la solución de cimentaciones que se adopte estará siempre regida por los informes obtenidos. Por el contrario, cuando las cavidades del

subsuelo pasan inadvertidas, por falta o deficiencia de estudios, con el tiempo las construcciones experimentan daños que pueden ser desde simples agrietamientos hasta la falla total de las estructuras. Por lo anterior, no se considera como criterio sano que se eviten o se limiten los estudios indispensables por falsa economía.

En el estado actual del avance de la técnica, el problema de la detección de cavidades dista mucho de estar resuelto, y no existe un método único, eficaz y seguro para este fin. Por tanto, todos los métodos que a continuación se tratan tienen sus limitaciones, así como sus ventajas en determinados casos.

1.4.1) Reconocimiento Superficial

La fase inicial de cualquier estudio del subsuelo debe consistir en un reconocimiento superficial del área donde se localiza el predio que interese. Cuando este reconocimiento es hecho con el alcance y cuidado debidos, es de gran ayuda para definir el problema y programar las etapas subsecuentes de exploración de cavidades, en el caso de que éstas se requieran.

La demarcación del área del reconocimiento constituye otro aspecto importante. Sobre este particular es difícil emitir normas o lineamientos, aún generales, ya que depende fundamentalmente de las condiciones específicas de cada sitio, así pues dependerá de la experiencia del ingeniero encargado.

El reconocimiento consistirá en el recorrido detallado del área en cuestión, prestando especial cuidado a las barrancas, cañadas y cortes cercanos al predio, para investigar la existencia de bocas de minas, así como de rellenos, muros o construcciones que pudieran ocultarlas.

En caso de encontrar bocas de minas en el área, será necesario inspeccionarlas para determinar, si por su corto desarrollo y otra causa fuera de toda duda, puede en forma apreciativa o con una medición sencilla descartarse la posibilidad de que afecten al

predio. De no ser así, el recorrido de las minas servirá para conocer su estado y condiciones de acceso con miras a programar su exploración por métodos directos.

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. A manera de antecedentes e información, deben recabarse datos entre los habitantes del lugar, sobre la existencia de minas en el área procurando obtenerlos de las personas que tengan más tiempo viviendo en ese sitio, y que sean más o menos confiables. Igualmente útil puede ser la interpretación de fotografías aéreas antiguas de la zona, en las que se puedan localizar bocaminas y probables frentes de explotación.

Además de la existencia de minas, en el reconocimiento deberá investigarse la ocurrencia de otros problemas comúnmente asociados con ellas, como son presencia de rellenos superficiales, que suelen encontrarse en estado suelto y es posible que sean producto de la demolición de bóvedas de cavidades preexistentes, así como fenómenos de inestabilidad de laderas de barrancas y cortes, que pueden originarse por la falta del techo de minas que de ellas arranque.

Cuando del reconocimiento se concluya categóricamente que bajo el predio que interesa no existen minas, el estudio se terminará en esta etapa. En caso contrario, deberá procederse a una segunda fase de exploración, mediante los métodos que se tratan a continuación.

1.4.2) Exploración de Cavidades

Si el reconocimiento superficial previo indica la existencia dudosa o comprobada de minas en el área, se llevará a cabo su exploración aplicando uno o la combinación de los métodos siguientes.

Cabe señalar que esta clasificación se propone exclusivamente para efectos de exploración de cavidades.

- a) Directos, 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 un hombre.
- b) Semidirectos, consistentes en sondeos de diámetros convencionales, efectuados desde la superficie del terreno, incluyendo las mediciones y observaciones hechas en ellos a partir de esta superficie.
- c) Indirectos, apoyados en procedimientos geofísicos, aplicados también desde la superficie o en el interior de sondeos.

1.4.2.1) Métodos Directos

Siempre que en el reconocimiento se descubran bocas o hundimientos accesibles de minas en el área, o que mediante trabajos de excavación, demolición, etc., se logre entrar en ellas, será necesario determinar si afectan o no al predio en estudio.

Cuando no haya sido posible hacer esta determinación por los métodos sencillos usados en el reconocimiento, se procederá a un levantamiento topográfico en planta de una poligonal por el o los ejes de galerías, el cual deberá ser preciso, efectuado de preferencia con tránsito y cinta.

Simultáneamente, se localizarán y referirán aquellas partes de las minas donde existen derrumbes, rellenos y sedimentos depositados por agua infiltrada, que impidan físicamente o hagan peligroso el acceso y, por tanto, no permitan continuar con el levantamiento mediante trabajos de excavación y limpieza u obras de protección y ademado provisionales.

En caso de que del levantamiento se concluyera que las minas quedan incluidas en el subsuelo del predio, 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.

Por otra parte, se inspeccionarán de manera minuciosa las cavidades para conocer las características de los materiales explotados, que en general constituirán las paredes, y de los que forman su techo y piso. Especial atención deberá ponerse al establecer, al menos cualitativamente, las condiciones de alteración y fisuramiento del techo y sus elementos de soporte, como son paredes y pilares.

En función de los resultados del reconocimiento que precede, cuando la totalidad de las minas o la parte de ellas que interesa haya sido accesible, y su levantamiento se realizó de manera satisfactoria, estos serán suficientes para estudiar la solución al problema de cimentación.

Si el levantamiento total de las minas o de su parte que afecta al predio no fuera posible, o bien si el reconocimiento previo indicara que persiste la posibilidad de que otras minas no accesibles pudieran interesar a éste, será necesario aplicar los métodos de exploración semidirectos e indirectos.

Al clasificar los métodos de exploración se incluyeron, dentro de los métodos directos, aquellas excavaciones o perforaciones de gran diámetro, en las que pueda introducirse un hombre, hechas para investigar la causa de irregularidades detectadas por métodos semidirectos o indirectos. Cuando la anomalía se localice a poca profundidad o los rellenos sean de reducido espesor, podrán excavarlos pozos convencionales a cielo abierto, cuya profundidad en general es limitada. En caso contrario, se requerirá de perforaciones de unos 0.80 m de diámetro mínimo, efectuadas por equipo del tipo usado en la construcción de pilas o pilotes, que permiten alcanzar profundidades del orden de 30 m, en los materiales de los lomeríos del poniente de la Ciudad de México.

1.4.2.2) Métodos Semidirectos

Al igual que los métodos indirectos, los métodos semidirectos se utilizarán en aquellos casos en que el reconocimiento superficial no hay permitido asegurar la ausencia de minas, o bien cuando las condiciones actuales de éstas no hagan factible la exploración

directa completa y satisfactoria. Su aplicación puede resultar indicada en los siguientes casos:

- a) en predios de dimensiones reducidas limitados por colindancias;
- b) para estudiar la cimentación de futuras construcciones de ciertas características específicas y bien definidas, que cubrirán parte o la totalidad de un predio, de cualesquiera dimensiones;
- c) en predios que en la actualidad están cubiertos totalmente por construcciones;
- d) para investigar anomalías detectadas por los métodos indirectos;
- e) en predios en los que mediante un reconocimiento superficial se hubieran apreciado hundimientos o grietas en la superficie;
- f) para investigar la causa del mal comportamiento y daños de estructuras ya construidas.

Antes de entrar al detalle de los métodos semidirectos y su aplicación a los casos anteriores, se considera importante establecer con claridad sus limitaciones.

Un sondeo o perforación sólo es una exploración en un punto, de la cual, cuando está correctamente ejecutada, no será posible concluir más que si existe o no en el sitio una anomalía, grieta o cavidad. Por tanto, la investigación mediante sondeos de minas subterráneas bajo un área de cierta extensión, depende de la densidad de sondeos o número de ellos efectuado por unidad de área, previendo que la longitud de éstos sea la apropiada.

En el caso a, dada la reducida extensión del predio, es factible lograr una densidad de sondeos aceptable a un costo bajo. Por otra parte la aplicación de métodos indirectos es a veces impropio.

Respecto al caso b, el programa de exploración deberá adaptarse a la distribución de los elementos estructurales, la magnitud de las descargas que transmitirán al subsuelo, y el tipo de cimentación que se prevea tentativamente.

En el caso c, las construcciones representan un serio obstáculo para la aplicación e interpretación de métodos indirectos. La ejecución de sondeos, si bien se ve dificultada, es factible realizar, sobre todo si se utilizan equipos de perforación pequeños.

En los casos d, e y f, es obvio que los sondeos se realizarán en sitios de anomalías, "hundidos", grietas o daños, dependiendo el número y distribución de la geometría de estos defectos.

Por lo que se refiere a los sondeos, cuando éstos tengan por único objeto detectar cavidades, podrán hacerse sin recuperar muestras, de preferencia empleando equipo rotatorio y brocas tricónicas de 7.6 cm de diámetro mínimo, del tipo recomendado para perforar materiales de dureza media.

La perforación de los sondeos mediante martillos neumáticos u otras herramientas, se considera menos apropiada para explorar cavidades, en la zona que se ocupa, que la perforación con equipo rotatorio.

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.

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 y mecánicas.

En lo que respecta a la longitud de los sondeos, se determinará en cada caso en función de la profundidad del nivel inferior de cavidades probables o existentes en el

sitio, dato del reconocimiento superficial, pero sin exceder la profundidad máxima de las barrancas o cortes cercanos, en los que se sospecha o conoce que se inician las minas.

Independientemente del método de perforación que se emplee, los sondeos estarán a cargo de personal con experiencia en esta clase de trabajos, observando cuidadosamente y en todo momento aspectos indicativos de la existencia de oquedades o cavidades rellenas.

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 alcanzar de nuevo el terreno natural resistente, se podrá volver a aplicar el método de perforación inicial.

Una vez que se ha registrado una irregularidad en el sondeo será necesario averiguar su causa y, tratándose de una cavidad, deberán investigarse sus condiciones de accesibilidad, con miras a efectuar su levantamiento por los métodos directos tratados en el punto anterior.

Cuando la altura libre de las minas sea reducida, o que por otra causa no sea posible penetrar en ellas y levantarlas, en el caso de obras cuyo costo e importancia así lo amerite, podrá conocerse de manera aproximada la geometría de las cavidades por un procedimiento, el cual consiste en la restitución del contorno de esas oquedades mediante la interpretación de fotografías estereoscópicas verticales, tomadas con una cámara introducida a ellas en varios sondeos convenientemente situados. Orientando en las fotografías señales luminosas introducidas en otros sondeos distintos del de referencia, separados de él una distancia conocida, se construye una triangulación para apoyar la fotointerpretación aceptable, habiendo sido empleado con éxito en algunos casos.

A manera de conclusión de lo antes mencionado sobre los tipos de sondeos, en general se recomienda que al efectuar una exploración de cavidades por métodos semidirectos se combinen sondeos con muestreo y perforaciones sin recuperación de muestras. Los primeros proporcionan mayor información pero son más costosos, por lo que se programarán en menor número y se distribuirán a modo de cubrir toda el área por explorar.

1.4.2.3) Métodos Indirectos

Estos métodos son apropiados cuando, además de que interesa conocer la estructura geológica del subsuelo, es necesario definir las anomalías locales existentes (oquedades). También, es posible obtener información sobre los espesores y a veces la calidad de rellenos superficiales, que pueden ser producto de la demolición de bóvedas de minas o bien ocultar sus bocas.

En particular, para investigar áreas grandes, su empleo representa ventajas técnicas, y sobre todo económicas, con relación al de métodos semidirectos. La correcta aplicación de ellos permite delimitar en forma rápida aquellas partes del área que no presentan problemas de cavidades, señalando los sitios de anomalías en donde sí obliga practicar métodos semidirectos, y si fuera necesario los directos.

Al igual que para la investigación por métodos semidirectos, es indispensable que la profundidad real explorada alcance el nivel inferior de las barrancas o cortes cercanos, definidos en el reconocimiento superficial.

La forma más adecuada para iniciar la investigación es realizarla según direcciones paralelas, y lo más cercano posible a los límites del predio, de lado interior del mismo. Es importante no dejar ninguna posibilidad de límites de linderos sin explorar. Es obvio que el reconocimiento superficial previo ha permitido desechar la posibilidad de minas que se inicien en el predio, por lo que sólo interesan aquellas que proceden del exterior.

Una vez que se cuente con los resultados de la exploración realizada a lo largo de la línea perimetral, si no se tuvo evidencia de anomalías, podrá considerarse el estudio terminado. Por lo contrario, si los resultados acusan anomalías en algún tramo del perfil perimetral, será necesario verificar la continuidad de ellas, para distinguir las de origen geológico, tales como lentes o filones, de las provocadas por explotación subterránea. Con este fin se procederá a prospeccionar sobre un eje paralelo al anterior e interior, separado de él una distancia tal que permita disociar las influencias locales, limitándose a investigar los tramos en los cuales existen anomalías. En la práctica se ha observado la conveniencia de tener una separación entre ejes del orden de 5 a 10 m.

Si al analizar los resultados obtenidos a lo largo del perfil complementario, no se observa continuidad ni correspondencia de anomalías, se deberá a que éstas son atribuibles a variaciones geológicas, locales, o bien a que sí existe una cavidad, pero no se prolonga más hacia dentro del área. En función del uso futuro del predio, cuando el proyecto contempla construir en la o las áreas de anomalías, será indispensable recurrir a métodos semidirectos, si no, se da la investigación por terminada.

En el caso de que las anomalías detectadas en el primer perfil se repitan de forma similar en el segundo, se suspenderá la exploración por métodos indirectos, para dar paso a los semidirectos con la finalidad de explorar la causa de las anomalías.

Dentro de las investigaciones indirectas de exploración, pueden distinguirse dos grupos. El primero incluye los métodos de tipo clásico como son la magnetometría, la sísmica (reflexión y refracción), la termometría, la gravimetría, la medida de potenciales naturales y la resistividad. En el segundo, se agrupan aquellos métodos que son relativamente más recientes, por ejemplo la percepción remota, los trazadores radioactivos y medida de densidad por emisión radioactiva.

1.4.2.3.1) Métodos Magnéticos

Estos métodos se basan en la teoría clásica de la mecánica newtoniana; obedecen a la ley de Coulomb que consiste en la atracción o repulsión de dos masas proporcionalmente a ellas e inversamente al cuadrado de su distancia.

Para que exista un contraste magnético o electromagnético debido a una caverna, es necesario que el terreno circundante posea propiedades magnéticas o electromagnéticas muy marcadas. El caso es, sin embargo, que los materiales volcánicos son prácticamente inertes, es decir, sus propiedades magnéticas o electromagnéticas son muy similares a las del aire, en este caso, falta el contraste necesario para detectar anomalías en la superficie.

Tanto las mediciones magnéticas como las electromagnéticas no dependen sensiblemente de la cota de medición, lo cual abarata considerablemente su aplicación. Es posible recorrer un terreno con un magnetómetro portátil de precisión en una fracción del tiempo que se requiere para una prospección gravimétrica o eléctrica, y no hace falta estacar un cuadrículado especial. Por desgracia los resultados son muy dudosos ya que las fluctuaciones observadas pueden interpretarse de muchas maneras (variaciones de susceptibilidad magnética entre diferentes capas o estratos, inclusiones, variaciones del nivel freático, etc.) y no existe una relación causal con las cavernas.

Por este motivo, este método no debe utilizarse solo, sino siempre en combinación con otro, por ejemplo el gravimétrico o el de resistividad. El bajo costo del método magnetométrico lo hace especialmente atractivo para corroborar los resultados obtenidos por otros métodos. Cuando una caverna potencial ha sido localizada, el operador del magnetómetro puede recorrer el sitio y cerciorarse en pocos minutos de si existe una anomalía magnética o no.

No es recomendable utilizar estos métodos en forma exclusiva, a menos que existan condiciones geológicas especiales que aseguren un contraste electromagnético conveniente entre la caverna y el medio que la rodea.

1.4.2.3.2) Métodos Gravimétricos

Los métodos gravimétricos para la detección de cavernas se basan también en la teoría clásica de la mecánica newtoniana, desarrollada principalmente por Laplace y Poisson.

Un campo gravitacional es definido por un potencial escalar ϕ que obedece la ecuación de Poisson.

$$\nabla^2\phi = -4\pi\rho \quad (1.1)$$

ρ es la densidad del medio, que puede variar en función de las coordenadas (x, y, z). Por ejemplo en el espacio exterior y en la ausencia de masas, podemos escribir aproximadamente:

$$\nabla^2\phi = 0 \quad (1.2)$$

es decir, el campo gravitacional en el vacío obedece a la ecuación de Laplace. La fuerza de atracción en un punto cualquiera del campo gravitacional es:

$$f = -\rho\nabla\phi \quad (1.3)$$

Si se tienen dos masas puntuales de valor m_1 y m_2 la fuerza de atracción gravitacional que actúa sobre ambos puntos es, según la ley de Newton:

$$f = \gamma \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (1.4)$$

donde r es la distancia entre las masas y γ es la constante gravitacional cuyo valor aproximado es $6\,673 \times 10^{-8} \text{ cm}^3/\text{g} - \text{seg}^2$.

Cuando se utiliza un gravímetro para medir el campo gravitacional, la masa m_2 que acciona el resorte del aparato es constante. Por lo tanto, la fuerza f es directamente proporcional a la masa m_1 que se requiere medir, y es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre dicha masa y el gravímetro. Si dividimos la ecuación (1.4) entre la masa m_2 del sensor del gravímetro, obtenemos la aceleración medida por dicho gravímetro:

$$g = \gamma \frac{m}{r^2} \quad (1.5)$$

Supongamos ahora que movemos el gravímetro sobre la superficie de un semiespacio homogéneo de densidad ρ . Si este semiespacio contiene una caverna esférica de radio R y profundidad D , la deficiencia de masa con respecto al espacio homogéneo será:

$$m = \frac{4}{3} \pi \rho R^3 \quad (1.6)$$

y la anomalía gravitacional (es decir, la diferencia de aceleración entre el espacio homogéneo y el espacio con la caverna) será, según (1.5):

$$\Delta g = g - g_0 = -\frac{4}{3} \gamma \pi \rho \frac{R^3}{D^2} \quad (1.7)$$

Este cálculo supone que la relación R/D es suficientemente pequeña para que podamos tomar la deficiencia de masa como centrada en un punto. Si la caverna es relativamente grande o poco profunda, puede ser necesario calcular la anomalía gravitacional de acuerdo con las ecuaciones de campo (1.1) y (1.3), lo cual presupone un conocimiento previo de la forma geométrica de la caverna.

Aplicaciones:

En las aplicaciones que se han hecho del método gravimétrico para la detección de cavidades en el subsuelo del Valle de México, se han utilizado gravímetros portátiles. Estos aparatos permiten efectuar mediciones rápidas, del orden de 2 a 5 min. por estación gravimétrica según la dificultad del terreno y la pericia del operador.

Supongamos que tenemos un subsuelo uniforme con superficie plana, de densidad $\rho = 3.0 \text{ g/cm}^3$ que contiene una caverna esférica de radio $R = 1\text{m}$ a una profundidad $D = 10\text{ m}$. Entonces según la ecuación (8) la anomalía máxima sería:

$$\Delta g = 0.838 \times 10^{-7} \text{ cm/seg}^2 \quad (1.8)$$

La unidad práctica de aceleración gravitacional es el milésimo de cm/seg^2 (miligal).

La anomalía máxima causada por la caverna de 1 m a profundidad de 10 m es $\Delta g = 0.0008 \text{ mgal}$. Esta anomalía no puede ser detectada normalmente con un gravímetro común. En cambio, si el radio R fuera de 2m, la anomalía aumentaría en un factor de $2^3 = 8$ y la caverna sería marginalmente detectable, lo mismo que si la profundidad disminuyera de 10 a 3 m.

La figura (1.8) da una idea del procedimiento utilizado. Las estaciones gravimétricas se disponen a intervalos regulares, en general en una cuadrícula geométrica según el terreno. Cuando existe una caverna suficientemente grande y somera, se obtiene una anomalía negativa acampanada, como se ve en la figura.

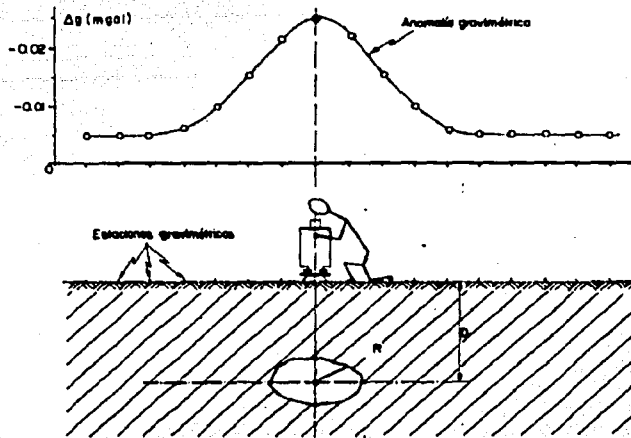


Figura 1.8 Aplicación del método gravimétrico.

Como el terreno es perfectamente plano, es necesario corregir el valor observado de Δg por el concepto de la elevación del terreno. Esto se hace por el método de Bouguer; es decir, se hace un levantamiento topográfico de las estaciones (con precisión al centímetro) y se supone en cada punto una capa de extensión infinita y de elevación Δh (diferencia de cota en relación a la cota cero, elegida arbitrariamente). Los cálculos correspondientes se efectúan en la computadora, ya que existen programas especiales para tal efecto.

Según el contraste de densidad ρ y el tamaño de las cavernas que se buscan, el método gravimétrico puede ser de mayor o menor efectividad. En el caso de cavernas en tobas volcánicas, como es el caso de la zona poniente del Valle de México, la utilidad del método es marginal, ya que el contraste de densidad es solamente del orden de 2 g/cm^3 y las cavernas son irregulares y mas bien pequeñas.

Las condiciones para la detección son mejores cuando se trata de cavernas de disolución en terrenos cársticos (calizas), o cavidades en coladas basálticas. En estos casos el contraste de densidad es mayor y con frecuencia las cavernas son más grandes, el terreno es más plano y geológicamente más homogéneo.

Como comentario adicional, este método es recomendable para exploración petrolera por su rango de eficiencia a grandes profundidades, por lo que difícilmente es ocupado en la detección de cavidades ya que son demasiado superficiales, además de que es el método geofísico más caro.

Microgravimetría

Recientemente existen en el mercado gravímetros Lacoste equipados con un sistema electrónico que permite extender el rango de medición a una sensibilidad del orden de fracción de microgal. Estos equipos son todavía más escasos y la experiencia que se tiene con ellos es muy reducida. Se han empleado principalmente en Francia, al parecer con éxito.

Debido a las dificultades que se presentan en el terreno, mencionadas antes, es probable que su uso en la detección de cavidades en tobas y cenizas volcánicas sea poco eficaz.

1.4.2.3.3) Métodos Sísmicos

Cuando se provoca artificialmente una oscilación en un punto del suelo, el movimiento inicial se trasmite al medio circundante en forma de vibraciones llamadas sísmicas o sismoelásticas.

La propiedad física fundamental en la que se basa la prospección geofísica por métodos sísmicos, es la variación de la velocidad de transmisión de las ondas elásticas en diferentes formaciones geológicas. Prácticamente las leyes de propagación sísmica siguen las mismas de la propagación óptica.

Método de Sísmica por Reflexión

Este método es muy parecido al reconocimiento de los fondos marítimos por el método ultrasónico (sonar). Se mide el tiempo que invierte una onda en recorrer el trayecto entre el punto de origen de las oscilaciones y el receptor (sismógrafo), después de reflejarse sobre una superficie de contacto entre dos terrenos de naturaleza distinta. Este procedimiento, muy sencillo en teoría, necesita en la práctica de maquinaria bastante complicada. La complejidad de los aparatos empleados se debe a que conviene determinar con seguridad la onda de regreso cuando todavía la superficie del suelo está en movimiento.

Cuando existe una reflexión, constatamos un desplazamiento simultáneo de todos los geófonos que viene a superponerse a los movimientos anárquicos precedentes. En este caso podemos definir con precisión el tiempo t de ida y vuelta de la onda y así obtener la profundidad h en función del tiempo y de la distancia x entre la emisión y la recepción de la onda, teniendo en cuenta la velocidad de la capa superior.

$$t = \frac{2}{V_1} \sqrt{h^2 + \frac{x^2}{4}} \quad (1.9)$$

La prospección por este método es una de las que da resultados precisos, por ello su uso es general para los reconocimientos petrolíferos. Desgraciadamente su empleo a poca profundidad es difícil y es rara vez usado para resolver problemas de Ingeniería Civil. En el caso de un terreno cuyo subsuelo es homogéneo, isótropo y semi - infinito, además de existir cavidades como ocurre en la Ciudad de México, el empleo de tal método es desaconsejable por no permitir localizar las cavernas.

Método de Sísmica por Refracción

Investigar el subsuelo por este método tiene una condición de aplicación que se asocia con la ley de Snell, la cual enseña que el cociente de las velocidades de propagación de las ondas a través de dos medios consecutivos homogéneos, paralelos e isótropos, es proporcional al cociente de los senos de los ángulos de incidencia y salida de las ondas sobre el plano de separación de ambos medios (Fig. 1.9); al coeficiente de proporcionalidad se le llama índice de refracción.

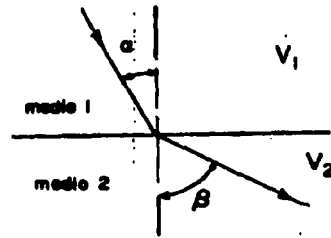


Figura 1.9 Dos medios con ángulo de incidencia distintos.

$$\frac{\text{sen } \alpha}{\text{sen } \beta} = \frac{V_1}{V_2} = n \quad (1.10)$$

$$\text{sen } i_{(n-1)} = \frac{V_{(n-1)}}{V_n} \quad (1.11)$$

La velocidad de transmisión de las ondas elásticas depende de las propiedades físicas del medio emisor. Cuando se provoca una oscilación, ella da nacimiento a varios grupos de ondas, de los cuales dos predominan:

- ondas longitudinales, que se propagan por compresiones o dilataciones sucesivas, cuya velocidad es V_L
- ondas transversales también denominadas ondas de distorsión o de esfuerzo cortante, que se propagan sin variaciones de volumen, cuya velocidad es V_T

Las velocidades se relacionan con el módulo elástico por medio de las expresiones siguientes:

$$V_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} x \frac{1-\sigma}{(1+\sigma)(1-2\sigma)}} \quad (1.12)$$

$$V_T = \sqrt{\frac{E}{\rho} x \frac{1}{2(1+\sigma)}} \quad (1.13)$$

En las expresiones (1.12) y (1.13) el símbolo E representa el módulo elástico (de Hooke), ρ el peso específico y σ el coeficiente de Poisson.

Teniendo en cuenta la expresión (1.11), la obtención de las medidas se realiza de la forma siguiente: en el área en donde se pretende realizar la investigación se sitúa el punto de origen de las oscilaciones y a ciertas distancias (en línea o en abanico) unos receptores (geófonos o sismógrafos), por medio de los cuales se mide el tiempo que tarda la onda sísmica en propagarse entre el origen del movimiento y cada uno de ellos. Los diagramas, llamados dromocrónicas, se llevan en coordenadas rectangulares, trazando en abscisas las distancias y en ordenadas los tiempos respectivos a cada uno de los receptores. Se van uniendo los diferentes puntos obtenidos, los cuales definen una velocidad aparente que sería real, si el subsuelo fuese homogéneo, isótropo, y que los diferentes estratos geológicos sean paralelos a la superficie del suelo. Estos diagramas son la base de los cálculos de profundidad.

Como prácticamente el subsuelo nunca está constituido en capas o estratos paralelos, es necesario realizar dos ensayos, uno directo y otro inverso que permiten calcular la inclinación de los diferentes contactos.

El emplear el método sísmico por refracción para detectar cavidades ocultas, independientemente de su tamaño, no es adecuado. En efecto, la excavación subterránea no puede compararse con una superficie continua de separación entre dos medios de características mecánicas diferentes. Es más asimilable una variación de compacidad

dentro de un mismo medio, que se reflejaría en un ligero y local retraso en el tiempo de propagación de las ondas sismoelásticas.

Para ilustrar lo anterior, tomemos el ejemplo de un terreno homogéneo e isótropo, en el cual existe una cavidad subterránea, que puede ser representada por un cuerpo cilíndrico hueco de longitud indefinida. Los dos casos extremos que pueden presentarse en el momento de realizar la investigación son: que la dirección en la cual se va a medir el subsuelo sea paralela al eje del cilindro o que sea perpendicular a él.

En el caso de la figura 1.10, en donde el eje del túnel coincide con el de medición, si el diámetro de aquél (ϕ) es superior a la altura de su techo, los tiempos de propagación van a aumentar y reflejan un retraso de las ondas en la dromocrónica. Si el diámetro del túnel es pequeño en relación con el espesor del techo, la propagación se va a comportar como si no existiera tal excavación, por presentar tiempos de retraso muy pequeños, inferiores con bastante frecuencia al nivel de sensibilidad del aparato.

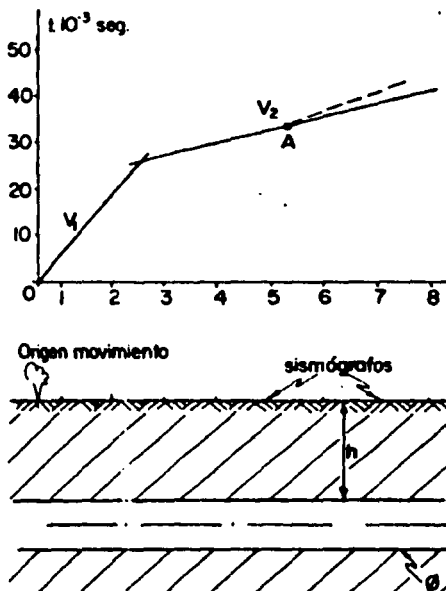


Figura 1.10 El eje del túnel coincide con el de medición.

La figura 1.11 muestra el caso de un túnel perpendicular al eje de mediciones. La anomalía provocada por la excavación se refleja en la dromocrónica por un retraso local en el tiempo de propagación de las ondas sismoelásticas, tanto más grande cuanto la relación d/ϕ disminuya.

Este retardo Δt en el tiempo de transmisión se va a notar, no sobre una vertical por la masa perturbadora, sino a una distancia mayor, desde el origen del movimiento. Esta condición representa para la interpretación de los datos un inconveniente, porque no son válidas las reglas clásicas de interpretación. Sólo por medio de modelos analógicos y computación se procede por tanteos hasta encontrar en el modelo el mismo tipo de anomalías obtenido y de amplitud proporcional.

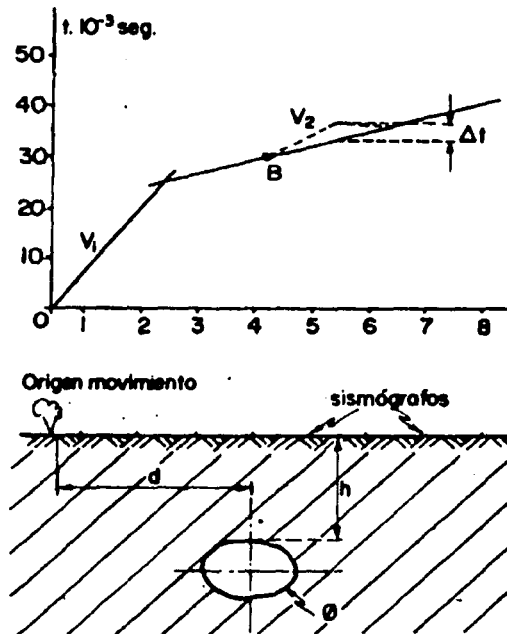


Figura 1.11 El eje del túnel es perpendicular al de medición.

1.4.2.3.4) Métodos Eléctricos

Los diferentes métodos eléctricos existentes se basan en el estudio de la distribución del subsuelo del campo eléctrico potencial creado por una corriente de intensidad conocida. La conductividad de un material es una propiedad que depende de cuatro factores:

- el volumen de los poros contenidos en el material
- la ubicación de estos poros

- el volumen (V_p) de poros llenos de agua
- la conductividad (σ_c) del agua intersticial

La conductividad del material (σ_s) está dada por la relación siguiente:

$$\sigma_s = \frac{V_p \times \sigma_c}{c} \quad (1.14)$$

en donde c es una constante para una disposición definida de poros.

Dentro de la multitud de variantes que ofrecen los métodos eléctricos, los que en realidad interesan para localizar cavidades ocultas se reducen prácticamente a dos, que son los métodos de mapas de potenciales naturales o artificiales y los de medición de resistividades absolutas.

Métodos de mapas de potencial

Estos métodos consisten en medir, por medio de dos electrodos clavados en la superficie del suelo, la diferencia de potencial natural o artificial entre ambos.

En el caso de la medición del potencial natural, el valor obtenido es siempre pequeño (del orden de varios milivoltios) y las anomalías del campo eléctrico provocadas por oquedades ocultas, son de la misma magnitud que el límite de sensibilidad de los aparatos de medición, salvo que se trate de cavernas prácticamente con una altura de techo del orden máximo de 1m. Además, a esta profundidad complica la interpretación, el efecto del horizonte superficial alterado y drenado, sumándose a las otras anomalías.

La medición por medio del mapa de potencial artificial consiste en inyectar una corriente de intensidad conocida y constante, por medio de dos electrodos situados fuera del área a investigar, midiendo la diferencia de potencial entre dos estaciones. Se repite la operación hasta cubrir toda la superficie que se pretende estudiar. Si varía la intensidad, se compensa proporcionalmente la medida de potencial.

A partir de las medidas realizadas en campo, se trazan en planta las curvas de igual potencial o equipotenciales. Las equipotenciales se interpretan por medio del estudio de sus distorsiones, que permiten trazar los ejes de las zonas conductoras o resistentes, y dar una idea sobre la forma y disposición en planta de estos cuerpos.

Los cuerpos conductores o resistentes que se encuentran cerca de la superficie dan anomalías muy acusadas pero de poca extensión, mientras que los profundos, dan anomalías menos acusadas pero de mayor extensión.

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 la rodean. Se hace excepción de aquellas bolsas subterráneas llenas de agua natural que se comportan como un elemento conductor.

En el caso de existir en el subsuelo una masa más resistente que el medio que la rodea, las líneas de corriente, paralelas en terreno homogéneo, tienen tendencia a circundarla. La figura 1.12 muestra la forma de desviación de campo eléctrico debido a la masa resistente (oquedad). La traza de esta anomalía en la superficie se notará menos si el elemento perturbador se encuentra a mayor profundidad.

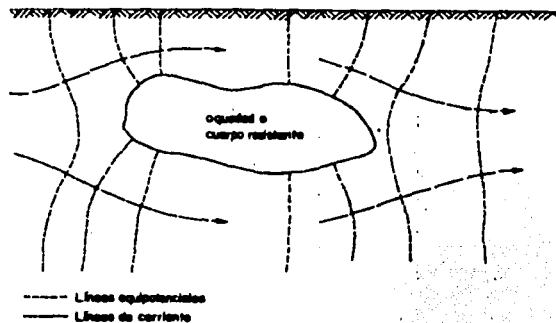


Figura 1.12 Desviación del campo eléctrico debido a la presencia de una cavidad.

Métodos de resistividad

Estos métodos se basan en la distribución del campo eléctrico en el subsuelo. Cuando se colocan en la superficie del terreno dos electrodos y se inyecta una corriente de uno A hacia otro B (Fig. 1.13), existe una diferencia de potencial positiva de la forma:

$$V_A - V_B \geq 0 \quad (1.15)$$

la caída de potencial se manifiesta a lo largo de la distancia AB.

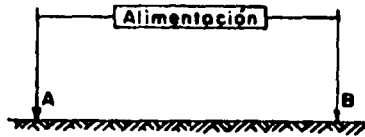


Figura 1.13 Electrodos A y B con inyección de corriente.

Todos los puntos del subsuelo que tienen potencial de igual valor definen una superficie equipotencial, la intersección de ésta con la superficie del terreno se le llama equipotencial.

Considerando lo anterior, el potencial en un punto P (Fig. 1.14) está dado por la expresión:

$$V = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{a'} \right) \quad (1.16)$$

siendo I la corriente que atraviesa el subsuelo, ρ la resistividad del medio, a y a' las distancias respectivas del punto P a A y B.

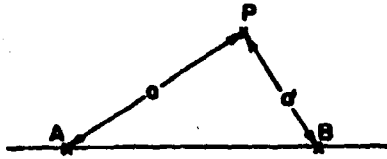


Figura 1.14

Ahora consideremos que los puntos A y B estén bastante separados para poder admitir que el campo eléctrico creado por el envío de corriente sea recto y paralelo a la superficie del suelo. El hecho de colocar otros dos electrodos M y N (Fig. 1.15) con una separación pequeña en relación de la distancia AB, permite medir una diferencia de potencial.

$$\rho = 2\pi K \frac{\Delta V}{I} \quad (1.17)$$

La expresión (17) hace posible establecer la expresión general de la resistividad media entre M y N con K función de los espacios entre electrodos a_1 , a_2 y a_3 .

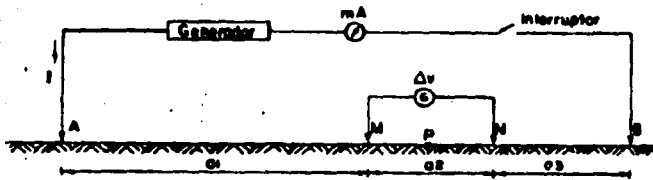


Figura 1.15 Electrodos A, B, M y N.

Desde un punto P del terreno, se van desplazando todos los electrodos en forma creciente y según una misma dirección. Para cada estación sucesiva del tetrapolo, se define una resistividad. Se calcula esta resistividad de manera que se obtenga un valor tal que si el medio fuese homogéneo, isótropo y semi – infinito, resultaría la medida obtenida en MN. Es por esta razón que la resistividad medida se denomina generalmente aparente.

Cuando se deja fijo el punto p y las distancias entre electrodos van creciendo, se está realizando una prospección eléctrica resistente vertical. A la inversa es decir, cuando P se mueve y las distancias entre electrodos quedan fijas, se está ejecutando una prospección eléctrica resistiva.

Como en general cada estrato del subsuelo tiene una resistividad característica, la prospección eléctrica vertical mide la variación de la resistividad aparente hasta una cierta profundidad. Esta variación es función de la resistividad y del espesor de cada estrato del subsuelo. Juntando varias prospecciones eléctricas en línea recta, se correlacionan los valores de todas las medidas y la interpretación del conjunto permite definir una estructura.

Las anomalías resistivas obtenidas se interpretan de la misma manera que para los mapas de potencial, salvo que ahora existe 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 las resistividades aparentes, que darán, además de la estructura geológica, la delimitación de las anomalías provocadas por cuerpos extraños existentes en el medio medido.

En la figura 1.16 se presenta una imagen eléctrica resistiva de un terreno con sus anomalías geológicas así como anomalías muy pronunciadas que pueden asociarse con una oquedad subterránea.

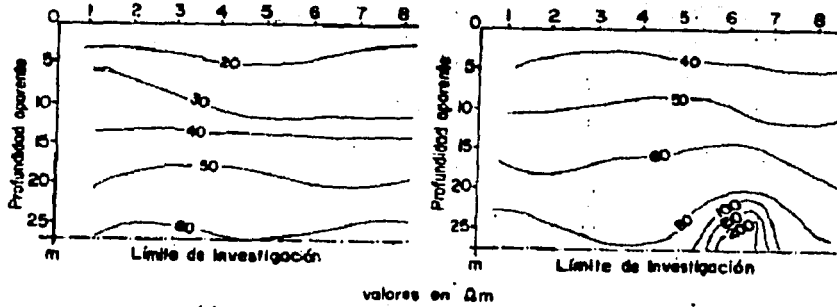


Figura 1.16 Imagen eléctrica resistiva de un terreno con sus anomalías geológicas y anomalías asociadas con una oquedad subterránea.

En la actualidad, los mejores resultados para investigar cavidades subterráneas, se obtienen usando métodos eléctricos, a condición de que estos se realicen de forma adecuada, y muchas veces superan a los métodos gravimétricos, aunque son más lentos para obtener el dato, y ligeramente más caros, por necesitarse mayor número de operarios para el desplazamiento de los electrodos.

1.4.2.3.5) Otros Métodos

En este subcapítulo se agrupan aquellos métodos de reciente aplicación, como son: la termometría, la percepción remota, los trazadores radiactivos, el método de densidad por emisión radiactiva, etc., porque son de poco interés para localizar cavernas de la zona poniente del Valle de México.

Métodos Termométricos

Estos métodos se basan en la medida de la temperatura del subsuelo utilizando los conceptos de gradiente vertical y grado geotérmico. El gradiente vertical en el subsuelo es el cociente de la diferencia de temperaturas entre la diferencia de profundidad de dos puntos.

$$\text{Grad} = \frac{\theta_B - \theta_A}{h_B - h_A} \quad (1.18)$$

La expresión (1.18) representa la variación de temperatura por unidad de profundidad. El grado geotérmico es la distancia que se debe aumentar a la profundidad donde se realiza la medida, para que la temperatura suba un grado. Esto interesa particularmente en la minería.

La temperatura del suelo es función del calentamiento solar, de las características térmicas de las formaciones geológicas y del flujo proveniente del interior de la tierra que se debe a la radiactividad interna.

Desde el punto de vista térmico, un cuerpo se define por su calor específico y su conductibilidad térmica. Estos dos parámetros permiten definir anomalías de poca profundidad.

Una vez en posesión de las medidas termométricas de campo, se realiza la corrección conveniente, según la profundidad en donde se hizo la lectura, y se procede a su interpretación. Para esto, se utilizan por lo menos dos series de medidas en épocas diferentes del año y se superponen los diagramas obtenidos. La diferencia obtenida se asocia con anomalías geológicas del subsuelo que se calientan y enfrían más o menos rápidamente, por causa de la diferencia de inercia térmica de cada uno de los elementos.

Métodos de percepción remota

Consisten en la adquisición de información de objetos, rasgos o fenómenos específicos, por medio de dispositivos colectores de información en posiciones remotas, para producir imágenes o mediciones de los rasgos observados.

A partir de fotografías del suelo obtenidas por medio de satélites o vuelos de baja altura, se estudia el problema. Generalmente estas fotografías son en blanco y negro, blanco y negro infrarrojo, emulsiones de color y color infrarrojo. Se apoya el vuelo por

medio de estaciones terrestres que permiten establecer un perfil de temperaturas para la calibración indispensable de los datos obtenidos del vuelo.

Por desgracia, las anomalías termométricas obtenidas a partir del vuelo no corresponden solamente a cavernas. Como los lugares en donde se encuentran las cavidades subterráneas ocultas corresponden a centros de población, las anomalías térmicas detectadas por control remoto se combinan con las anomalías superficiales debidas a la presencia de casas, calles, y en forma general vida humana, que distorsionan casi siempre el dato que interesa. Además la poca penetración del método (unos metros), suponiendo el estado actual del conocimiento, da resultados muy parciales.

Pero si por el momento este método no es adecuado para detectar cavidades ocultas, en cambio puede ser muy oportuno para descubrir fugas, tanto en las redes de agua potable como de drenaje, ya que el aporte de agua hacia una excavación subterránea provoca que el material se altere y pueda producirse un asentamiento del techo de dicha oquedad, traduciéndose en un hundimiento peligroso de toda el área circunvecina.

Métodos por trazadores radiactivos

Los métodos por trazadores radiactivos se aplican cuando las cavidades ocultas se encuentran en circulaciones accesibles de agua. Como puede verse, la aplicación de este método no es posible en la zona poniente del Valle de México donde el nivel freático se encuentra a mayor profundidad que las cavidades existentes, por lo que su uso implicaría la inyección de fluidos hacia las cavidades, y eso a su vez presupone que se conoce su existencia.

Métodos de densidad por emisión radiactiva

Se aplican estos métodos para la detección de cavidades muy pequeñas y superficiales. El radio de acción es de centímetros o de algunos decímetros.

1.4.3) Conclusiones y Recomendaciones

El éxito de un estudio de este tipo va a depender, en gran parte, del enfoque que se le dé en el momento del reconocimiento previo del área. En efecto, es al principio cuando se van a plantear los diferentes caminos a seguir en el desarrollo futuro de la investigación.

Es en el momento del reconocimiento previo que se debe analizar, además del aspecto técnico, el económico, en el sentido siguiente: "que no se considera criterio sano que por falsa economía, se eviten o se limiten los estudios indispensables", según se señaló en la introducción de este capítulo.

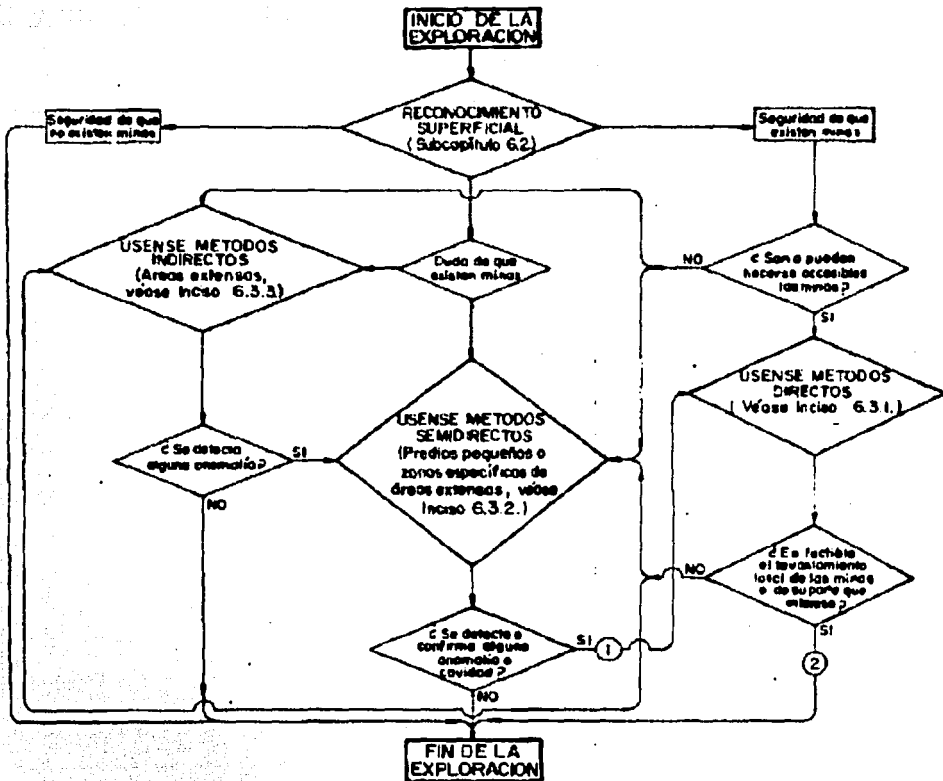
A continuación se resumen las diferentes formas de proceder:

- a) Todo estudio del subsuelo en zonas minadas se iniciará con un reconocimiento superficial detallado del área en que se localice el predio que interesa. La forma en que se efectuará este reconocimiento ya se mencionó anteriormente, recomendándose que las observaciones se presenten en un reporte escrito, acompañado de un informe fotográfico.
- b) Siempre que en el reconocimiento previo se determine que en el área existen bocas o hundimientos accesibles de minas, o que por algún medio se logre entrar en ellas, se intentará efectuar un levantamiento topográfico por los métodos directos descritos también anteriormente. Se recomienda que los resultados del levantamiento se proporcionen en un informe escrito, incluyendo los planos de los mismos en planta y elevación.
- c) Si el levantamiento directo de las minas no se completó a satisfacción, o bien, cuando según el reconocimiento superficial, persiste la duda sobre la existencia de minas bajo el predio, se recurrirá a la exploración mediante los métodos semidirectos o indirectos. Sea cual fuere el método que se emplee entre ambos, o

incluso su combinación, por razones técnicas o económicas, deberá ser elegido de tal forma que dé el resultado deseado.

- d) Con relación a los métodos semidirectos, su aplicación puede resultar indicada en los casos ya mencionados. En general se recomienda que en una exploración de cavidades por estos métodos, se combinen sondeos con muestreo y perforaciones sin recuperación de muestras, los primeros hechos antes y en menor número que los segundos.
- e) Por lo que respecta a los métodos indirectos, su número es elevado, pero no todos son aplicables para la exploración de cavidades en la zona poniente del Valle de México. Sus ventajas y limitaciones ya se mencionaron.

Como corolario de todo lo anterior, en el diagrama sinóptico (fig. 1.17) se ilustra la forma de proceder que se recomienda en general para la exploración.



- 1 Ejecución de excavaciones o perforaciones de gran diámetro para bajar un hombre. Como alternativa intermedia, uso de periscopios y cámaras fotográficas o de televisión.
- 2 Ejecución de excavaciones o perforaciones sólo para verificar el levantamiento topográfico.

Figura 1.17 Forma de proceder que se recomienda en general para la exploración.

1.5) Método utilizado en el Municipio de Atizapán de Zaragoza en la detección y exploración de zonas minadas.

1.5.1) Radar de Gran Penetración (GPR) o Radar de Interfase Subterráneo (SIR)

El SIR es un sistema de radar de propósito general, penetrador del subsuelo, de canal único y portátil. Consta de los siguientes artículos:

- Unidad de control digital (DC-2)
- Cable de control de antena
- Cable de potencia CD
- Adaptador de conexión de potencia
- Cable adaptador para actualización
- Maletín acolchonado

Los componentes externos de la unidad de control son el teclado, la pantalla de video, el panel interconector y las luces indicadoras. En el capítulo 3 se pueden observar fotografías del equipo durante su funcionamiento.

Como trabaja un sistema SIR

El sistema SIR es de baja potencia, el cual transmite energía electromagnética en un rango de frecuencias de 16 MHz a 2000 MHz dentro del subsuelo. La potencia total de transmisión es menor que la que utilizan los radios de onda corta.

La siguiente figura muestra como trabaja el sistema:

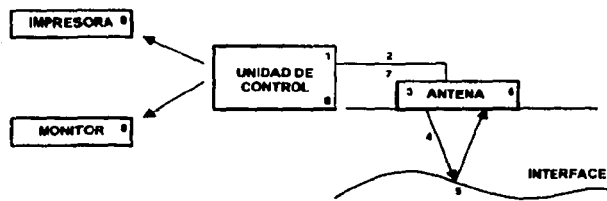


Figura 1.18 Forma de trabajar del sistema SIR.

- 1) El pulso es generado en la unidad de control con una frecuencia de alrededor de 50 KHz. a 50 KHz, el tiempo de recepción es de 20 microsegundos para una antena de potencia normal.
- 2) El pulso generado es enviado por la unidad de control a través de un cable al circuito transmisor en la antena
- 3) En la antena, cada impulso generado por la unidad de control es transformado en un impulso bipolar con una amplitud mayor que el original. La forma del impulso varía con la electrónica de las antenas.
- 4) El pulso transmitido es radiado de la antena al subsuelo. El tamaño de la antena y las propiedades del subsuelo determinaran la frecuencia de la energía propagada.
- 5) En el subsuelo las reflexiones ocurren cuando existe un cambio en las propiedades dieléctricas de los materiales. La parte reflejada de la señal viaja de regreso a la antena.
- 6) El receptor de la antena detecta la señal reflejada y la envía de regreso a la unidad de control.

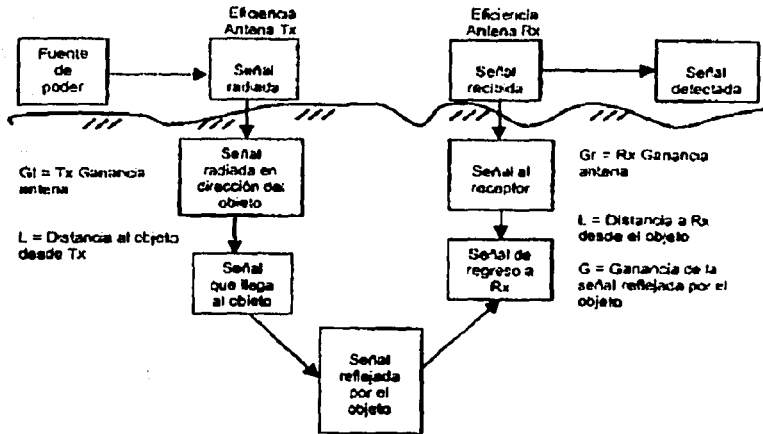


Figura 1.19 El receptor de la antena detecta la señal reflejada y la envía de regreso a la Unidad de control.

7) En la unidad de control la señal es procesada y desplegada en pantalla.

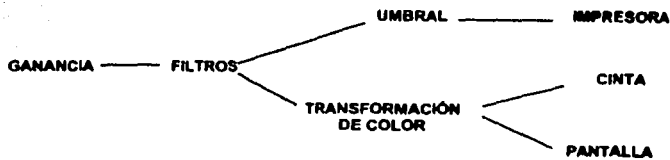


Figura 1.20

8) La señal de salida se puede imprimir o mostrar en pantalla.

Existen cuatro formas de despliegue de datos:

- Escala de grises (Figura 1.21)
- Escala de color

- Formato Sísmico (Figura 1.22)
- Osciloscopio (Figura 1.23)



Figura 1.21 Escala de grises.

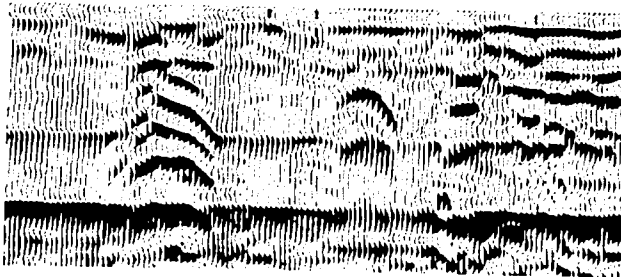


Figura 1.22 Formato sísmico.

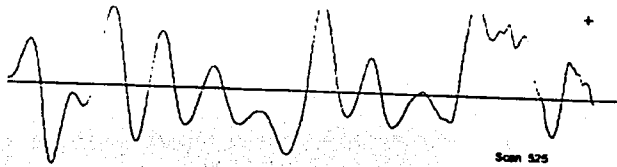


Figura 1.23 Osciloscopio.

Existen dos propiedades eléctricas importantes en el trabajo con SIR:

- Conductividad Eléctrica
- Permittividad Eléctrica (Constante dieléctrica)

La conductividad eléctrica es la capacidad de un material para conducir la corriente eléctrica. El rango de valores va de 4 a 10^{-9} S/m (Siemens/metro). Su recíproco es la resistividad media en Ω -m (ohm-metro). Los valores son controlados principalmente por el contenido de agua y el contenido de arcilla. Cuando la conductividad del terreno es alta provocará problemas de penetración para la señal del radar, conductividad > 0.01 S/m son condiciones difíciles para trabajar con SIR.

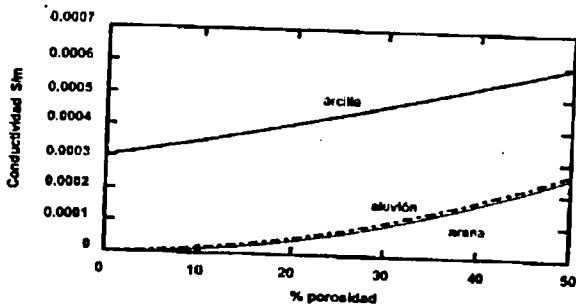
La conductividad de suelos y sedimentos no saturados se puede calcular con la siguiente expresión:

$$\sqrt{\sigma} = n(1-s)\sqrt{\sigma_a} + ns\sqrt{\sigma_w} + (1-n)\sqrt{\sigma_s} \quad 1.19$$

donde:

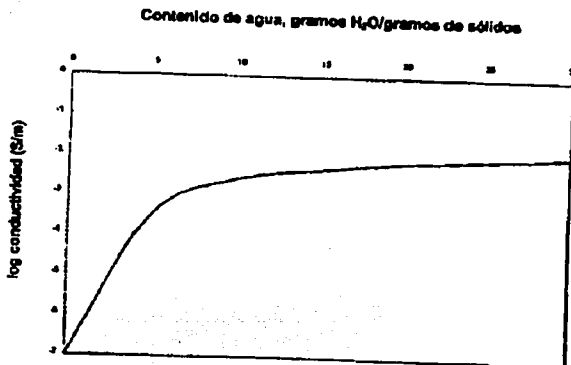
- σ = conductividad de la capa de sedimento
- σ_a = conductividad del aire
- σ_w = conductividad del agua
- σ_s = conductividad de las partículas del suelo
- n = factor de porosidad (%)
- s = grado de saturación

La variación de la conductividad como función de la porosidad en los sedimentos se muestra en la siguiente gráfica:



Gráfica 1

El efecto del contenido de agua en la conductividad eléctrica se muestra en la siguiente gráfica:



Gráfica 2

Existe una división general de los materiales de acuerdo a su conductividad eléctrica y es la siguiente:

- a) Conductividad Baja. Excelentes condiciones para el trabajo con radar. Conductividad $< 10^{-7}$ S/m. Ejemplos: aire, granito seco, caliza seca, concreto, asfalto.
- b) Conductividad Media. Condiciones buenas para el trabajo con radar. El rango de conductividad va de 10^{-7} a 10^{-2} S/m. Ejemplos: agua dulce, hielo, nieve, arena, arcilla seca, basalto, hielo de agua salada.
- c) Conductividad Alta. Condiciones difíciles para el trabajo con radar. Conductividad $> 10^{-2}$ S/m. Ejemplos: arcilla húmeda, lutita húmeda, agua de mar.

En la siguiente figura (Figura 1.24), se muestran algunos valores de resistividad (recíproco de conductividad eléctrica) para rocas y materiales comunes.

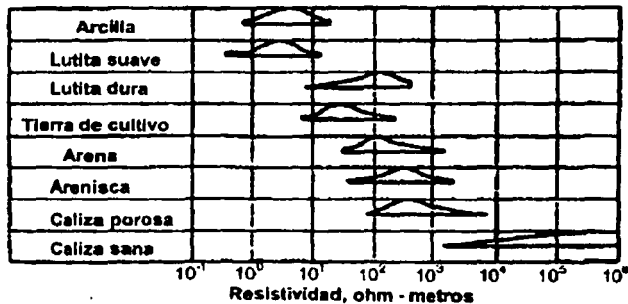


Figura 1.24 Valores de resistividad para rocas y materiales comunes.

Tabla 2. VALORES APROXIMADOS DE CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (σ) Y PERMITIVIDAD DIELECTRICA (ϵ_r) PARA DIVERSOS MATERIALES

MATERIAL	σ (S/m)	ϵ_r
Aire	0	1
Agua dulce	$10^{-1} - 3 \times 10^{-2}$	81
Agua de mar	4	81
Hielo de agua dulce	10^{-3}	4
Granito seco	10^{-8}	5
Caliza seca	10^{-9}	7
Arcilla saturada	$10^{-1} - 1$	8 - 12
Nieve	$10^{-6} - 10^{-5}$	1.4
Arena seca	$10^{-7} - 10^{-3}$	4 - 6
Arena saturada	$10^{-2} - 10^{-2}$	30
Aluvión	$10^{-3} - 10^{-2}$	10
Hielo de agua salada	$10^{-2} - 10^{-1}$	4 - 8
Basalto húmedo	10^{-2}	8
Granito húmedo	10^{-3}	7
Lutita húmeda	10^{-1}	7
Arenisca húmeda	4×10^{-2}	6
Caliza húmeda	2.5×10^{-2}	8
Suelo:		
Arenoso seco	1.4×10^{-3}	2.6
Arenoso húmedo	6.9×10^{-3}	25
Limoso seco	1.1×10^{-3}	2.5
Limoso húmedo	2.1×10^{-2}	19
Arcilloso seco	2.7×10^{-3}	2.4
Arcilloso húmedo	5×10^{-2}	15
Suelo congelado	$10^{-3} - 10^{-2}$	4 - 8

La permitividad dieléctrica relativa (ϵ_r) es la capacidad de un material para retener o almacenar carga cuando un campo eléctrico es aplicado. Los valores pueden variar entre 1 y 81. Los valores están controlados principalmente por el contenido de agua. La diferencia en constante dieléctrica entre los límites o fronteras de los materiales provocan reflexiones. La intensidad de las reflexiones está controlada por el contraste

en las constantes dieléctricas de dos materiales adyacentes. Las diferencias en constante dieléctrica mayores o iguales a 1 provocan reflexiones en los datos del SIR.

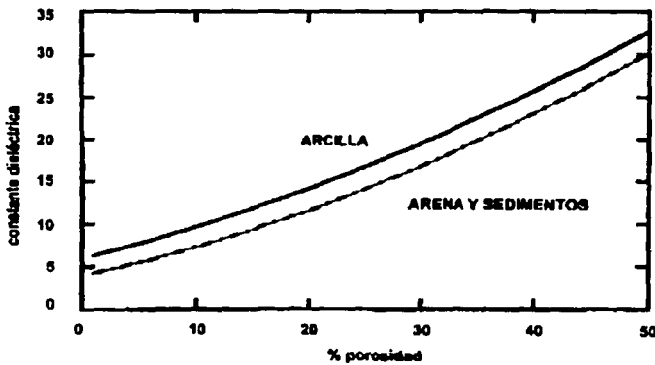
La constante dieléctrica de suelos y sedimentos no saturados se puede calcular con la siguiente expresión:

$$\sqrt{\epsilon} = n(1-s)\sqrt{\epsilon_a} + ns\sqrt{\epsilon_w} + (1-n)\sqrt{\epsilon_s} \quad 1.20$$

donde:

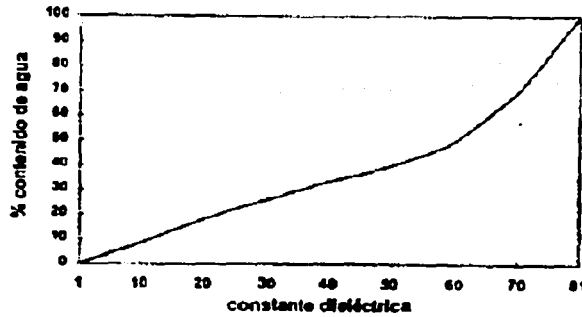
- ϵ = constante dieléctrica de la capa de sedimento
- ϵ_a = constante dieléctrica del aire
- ϵ_w = constante dieléctrica del agua
- ϵ_s = constante dieléctrica de las partículas de suelo
- n = factor de porosidad (%)
- s = grado de saturación

Existe una variación de la constante dieléctrica como función de la porosidad de los sedimentos como lo indica la siguiente gráfica:



Gráfica 3

El efecto del contenido de agua en la constante dieléctrica se muestra en la siguiente gráfica:



Gráfica 4

Tabla 3. CONSTANTE DIELECTRICA DE ALGUNOS MATERIALES

MATERIAL	CONSTANTE DIELECTRICA
Aire	1
Nieve	1 - 2
PVC	3
Asfalto	3 - 5
Hielo	4
Concreto	4 - 11
Lecho Rocoso:	
Granito	4 - 7
Arenisca	6
Lutita	5 - 15
Caliza	4 - 8
Basalto	8 - 9
Suelos y Sedimentos	4 - 30
Agua salada y dulce	81

Como ya se mencionó anteriormente la diferencia en constante dieléctrica entre los límites o fronteras de los materiales provoca reflexiones, a continuación se muestra el cálculo de dicha reflexión. Cuando se tienen dos estratos de distinto material (figura 1.25), evidentemente estos tendrán diferente constante dieléctrica.

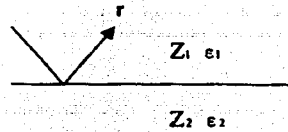


Figura 1.25

Para calcular el coeficiente de reflexión entre dos estratos o capas se utiliza la siguiente ecuación:

$$r = \frac{Z_1}{Z_2} \quad 1.21$$

donde:

- Z_1 = impedancia de la capa 1
- Z_2 = impedancia de la capa 2
- r = coeficiente de reflexión

$$Z = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\epsilon}} \quad 1.22$$

donde:

- j = $\sqrt{-1}$
- ω = $2\pi f$
- μ = susceptibilidad magnética
- ϵ = constante dieléctrica

En el SIR lo anterior se simplifica como:

$$r = \frac{\sqrt{\epsilon_2} - \sqrt{\epsilon_1}}{\sqrt{\epsilon_2} + \sqrt{\epsilon_1}} \quad 1.23$$

El procedimiento para realizar un estudio con el SIR contiene los siguientes pasos:

- Estimar las características del objeto
- Determinar el tamaño de malla para el área de estudio
- Seleccionar la antena apropiada
- Configurar el Sistema SIR
- Realizar líneas de prueba
- Ajustar el Sistema SIR para obtener datos óptimos
- Adquirir los datos

Las características del objeto son las siguientes:

- Profundidad del objeto
- Dimensiones del objeto
- Como están definidos los límites o fronteras entre los objetos
- Propiedades eléctricas de los objetos y de los materiales que lo rodean

Existen varios métodos para determinar la profundidad del objeto a partir de los datos del Sistema SIR, a continuación se muestran:

a) Método 1. Estimando la Velocidad a partir de la constante dieléctrica

$$V = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad 1.24$$

$$TT = \frac{1}{V} = \frac{\sqrt{\epsilon_r}}{c} \quad 1.25$$

$$TT(ns/m) = 6.6\sqrt{\epsilon_r} \quad 1.26$$

$$TT(ns/ft) = 2\sqrt{\epsilon_r} \quad 1.27$$

donde:

- c** = velocidad de la luz en el vacío (3×10^8 m/s)
- ϵ_r** = constante dieléctrica
- V** = velocidad del medio (m/ns)
- TT** = tiempo doble de viaje por unidad (slowness), ns/m

Tabla 4. PROPIEDADES ELECTROMAGNÉTICAS DE DIVERSOS MATERIALES

MATERIAL	σ (S/m)	ϵ_r	TT (ns/ft)	TT (ns/m)
Aire	0	1	2	7
Agua dulce	$10^{-4} - 3 \times 10^{-2}$	81	18	59
Agua salada	4	81	18	59
Arena seca	$10^{-7} - 10^{-3}$	4 - 6	4 - 5	15
Arena saturada	$10^{-7} - 10^{-2}$	30	11	36
Aluvión saturado	$10^{-1} - 1$	10	6	20
Arcilla saturada	0.002	8 - 12	6	20
Arena costera seca	0.008	10	6	20
Pantano Selvático	0.01	12	7	23
Tierras de cultivo	0.005	15	8	26
Tierras de pastoreo	10^{-2}	13	7	23
Hielo de agua dulce	$10^{-3} - 10^{-2}$	4	4	13
Suelo congelado	10^{-8}	4 - 8	5	16
Granito seco	10^{-3}	5	4.5	15
Caliza seca		7 - 9	5	16
Dolomía		7 - 8	2.5	8
Cuarzo		4	4	13
Carbón		4 - 5	4	13
Concreto		6	5	16
Asfalto		3 - 5	4 - 5	13 - 16
Hielo de agua salada		4 - 12	4 - 7	13 - 23
PVC, Epóxico				
Poliéster, Vinil, Caucho		3	4	13

b) Método 2. Localizar objeto de profundidad conocida

- Colectar una línea del SIR perpendicular al eje de mayor longitud del objeto de profundidad conocida, como puede ser un tanque o una tubería.
- Determinar el tiempo de viaje de la señal del objeto, desde los datos del SIR

- Estimar la velocidad del material: $\text{Velocidad} = \text{Tiempo de viaje} / \text{Profundidad}$
- La profundidad de los objetos conocidos puede ser estimada usando: $\text{Profundidad} = \text{Tiempo de viaje} / \text{velocidad}$

c) Método3.

Cuando un objeto cilíndrico como una tubería, tiene superficies que son anormales al patrón de radiación de la antena, cuando la antena se aproxima y pasa en ángulos rectos a la tubería, una difracción hiperbólica es mostrada en el registro. La hipérbola puede ser usada para encontrar la profundidad de la tubería conociendo la distancia sobre el terreno y el tiempo, los cuales se pueden obtener de los datos del registro.

Cuando la antena se aproxima a la tubería, ésta empieza a ser detectada por la antena cuando la línea del cono de radiación entre la tubería y la antena es de aproximadamente 45° . La reflexión de la tubería llega a un tiempo que es igual al "tiempo de inclinación", t_z , o la distancia entre el objeto y la antena. Conforme la antena se aproxima y pasa sobre la tubería, el tiempo de arribo de la reflexión del objeto decrece.

Si suponemos que la distancia Z es en promedio igual a la distancia X y que las dimensiones de la tubería son insignificantes (el diámetro de la tubería es menor que un cuarto de su profundidad), en comparación con los otros parámetros entonces:

$$X^2 + Y^2 = Z^2 \quad 1.28$$

y

$$\frac{t_x}{t_z} = \frac{Y}{Z} \quad 1.29$$

donde:

- X = distancia a lo largo del terreno en pies o metros
- Y = profundidad de la tubería en pies o metros
- t_z = tiempo de viaje o tiempo de inclinación a la tubería
- t_y = incidencia normal del tiempo de viaje a la tubería

Combinando las dos ecuaciones obtenemos:

$$Y = \frac{X}{\sqrt{\left(\frac{t_z}{t_y}\right)^2 - 1}} = KX \quad 1.30$$

NOTA: En la práctica el uso más simple de la ecuación resulta cuando la relación (t_y/t_z) se le da un número conveniente tal como 1.4 en cuyo caso el factor K es de 1 a 2 % y la profundidad de la tubería es igual a la distancia X.

Escala Geométrica

En la siguiente figura (1.26) se observa el cálculo de la profundidad de una tubería a partir de la hipérbola.

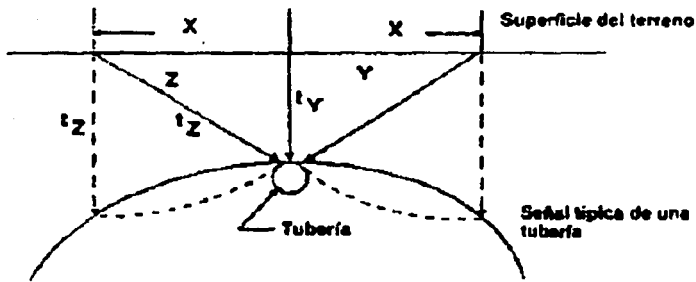


Figura 1.26 Cálculo de la profundidad de una tubería a partir de la hipérbola.

Usando el tiempo doble de viaje de la señal desde el radargrama y el cálculo de la profundidad hecho anteriormente, la lentitud (slowness) puede ser calculada como:

$$TT = T / \text{Profundidad}$$

Donde:

TT = Lentitud (slowness)

T = Tiempo doble de viaje

Para estimar la profundidad de objetos de profundidad desconocida, podemos usar:

$$\text{Profundidad} = T / TT$$

Donde:

T = tiempo doble de viaje

TT = lentitud (slowness)

d) Método 4.

En la figura 1.27 se muestra el funcionamiento del método 4 utilizando un punto de profundidad común.

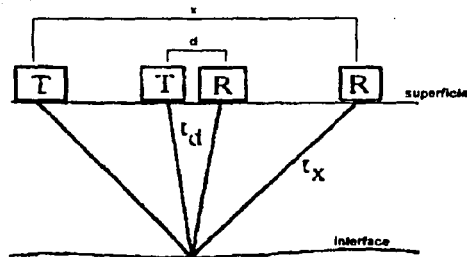


Figura 1.27 Funcionamiento del método 4 utilizando un punto de profundidad común.

Para calcular la velocidad se utiliza la siguiente ecuación:

$$V = \frac{\sqrt{x^2 - d^2}}{\sqrt{t_x^2 - t_d^2}} \quad (1.31)$$

A continuación se muestran algunos consejos para realizar un trabajo con el SIR:

- Obtener toda la información disponible:
 - Planos del sitio
 - Registros y demás información geofísica
 - Conocer la geología local
 - Hablar con las personas del lugar

- Obtener el equipo apropiado
 - Medios para marcar en campo
 - Cinta métrica
 - Herramientas y papelería
- Hacer una inspección preliminar del sitio
 - Inspeccionar el terreno para ver si hay evidencias de entierros, cavidades, topografía inusual, etc.
 - Si es posible conocer la profundidad de un objeto para calibrar
 - Tomar fotografías del sitio
- Asegurarse de tener la fuente de poder adecuada
- Inicio:
 - Hacer pruebas en diferentes áreas para establecer los parámetros apropiados del sistema
 - Establecer la velocidad / profundidad usando algunos objetos
- Control del cable
 - Asegurar el cable a la antena
 - No jalar el cable cuando está atorado
 - Cuando esté caminando mantener el cable detrás o a un costado de la antena
 - Cuando la medición se haga en vehículo mantener el cable dentro del mismo
 - Nunca hacer mediciones con el cable debajo de la antena
- Cuando se está trabajando:
 - Las antenas deberán tener una velocidad constante en la misma dirección
 - Usar el marcador
 - Escribir el encabezado para llevar un registro detallado

Finalmente, existen ciertas condiciones necesarias para obtener buenos resultados de radar de penetración terrestre y son las que a continuación se muestran:

- Experiencia
- Contraste dieléctrico
- Angulo de reflectividad

- Antena apropiada
- Ajuste de la señal
- Buen operador
- Procesamiento de la señal
- Buen clima
- Tener confianza
- Esperar lo inesperado
- Baja conductividad
- Lugares accesibles
- Buena organización
- Velocidad adecuada
- Conocimiento del sitio
- Buena interpretación
- Entender lo que se está haciendo
- Tiempo
- Buen equipo
- Persistencia

CAPÍTULO 2

ESTABILIDAD Y TRATAMIENTO DE ZONAS MINADAS

2.1) Estabilidad de Terrenos Minados

En este subcapítulo se presentan algunas consideraciones teóricas y empíricas que se refieren a la estabilidad de terrenos minados, mencionando el alcance y las limitaciones de los métodos analíticos, en particular en terrenos del Valle de México. Se enumeran también los factores que afectan la estabilidad y se comenta en forma breve su importancia.

También se habla de las deformaciones en la superficie del terreno que se inducen al modificar el estado de esfuerzos original del subsuelo a causa de oquedades producidas al extraer materiales. Así mismo se tratan los aspectos de rotura de bóvedas y la falla de pilares, así como el fenómeno de migración de cavidades, el cual es típico en los suelos de los lomeríos del poniente del Valle de México. Finalmente se comenta, desde un punto de vista cualitativo, la influencia de sismos.

2.1.1) Factores que afectan la estabilidad

En tres grupos pueden clasificarse los factores que influyen en la estabilidad de terrenos minados:

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

Para el análisis y elección de soluciones es necesario conocer previamente estos factores. La profundidad de este conocimiento está limitada por las condiciones de caso particular.

En las zonas minadas del Valle de México, los materiales que predominan en general son deleznable, y su resistencia no es suficiente para garantizar la estabilidad de las bóvedas, en particular si éstas son de dimensiones amplias y de reducido espesor.

Los mantos en que se localizan las cavidades y por ende sus paredes y pilares, están formados comúnmente por suelos 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.

Al quedar expuestos los materiales al medio ambiente y a la acción de otros agentes, sufren con el tiempo alteraciones en deterioro de sus propiedades mecánicas, además de modificar en forma desfavorable las dimensiones iniciales de las cavidades.

Por tanto, en todo análisis de estabilidad debe tomarse en cuenta la acción de los diversos factores señalados, pero la determinación y evaluación de algunos de ellos como la influencia del intemperismo, es difícil, además de las limitaciones que presentan los métodos para el cálculo de capacidad de carga.

Ante esta situación el ingeniero debe recurrir a su criterio, apoyado en mediciones y observaciones confiables, así como a la experiencia que reportan diversos casos.

2.1.2) Deformaciones inducidas por la explotación

Los movimientos del terreno son una consecuencia inevitable de la explotación subterránea. Cuando la extracción de materiales del subsuelo ocurre en cantidades

considerables las formaciones que yacen sobre las cavidades se deforman y ocasionan movimientos en la superficie como:

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

El área afectada en la superficie es mayor que la que circunscribe el área explotada, lo que da lugar al concepto de “ángulo de influencia”.

En el caso de las zonas minadas del Valle de México, no existen mediciones a partir de las cuales se pueda determinar el valor del ángulo de influencia; sin embargo, en otros países como Gran Bretaña se ha determinado que su valor medio es de 35° . Esto significa que los movimientos se desarrollan hasta una distancia de 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 movimientos 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. 2.1). El área crítica de forma aproximadamente circular se define como la base imaginaria que proyecta arco bajo el punto P .

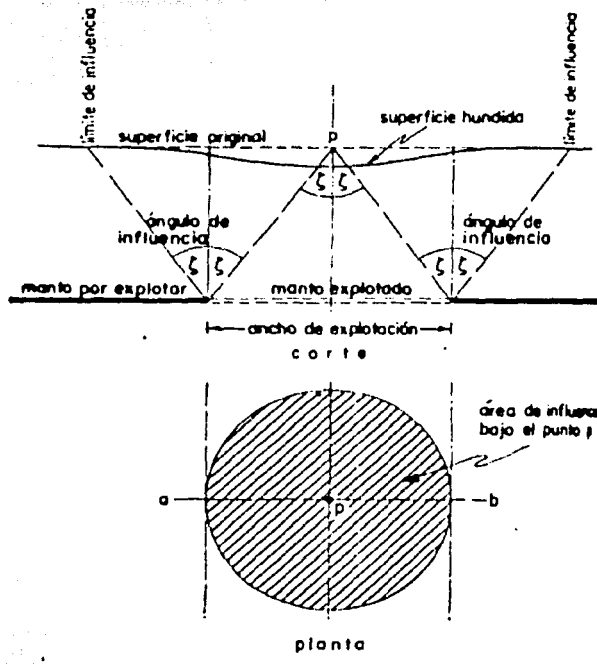


Figura 2.1 Ilustración del concepto de "área crítica".

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 que serán menores a medida que la fracción explotada de esa área es menor.

Dependiendo de la anchura de área explotada se establecen tres condiciones en cuanto a la magnitud de los asentamientos en la superficie: subcrítica, crítica y supercrítica.

Lo antes expuesto tiene por objeto señalar los asentamientos que se producen en la superficie y construcciones desplantadas sobre ella, al excavar una mina, cuyo pronóstico interesa en aquellos países para fines de proyecto de nuevas explotaciones. Pero en el caso de las minas del Valle de México que fueron explotadas hace tiempo, es muy probable que los movimientos ya hayan ocurrido en su totalidad; esto no puede afirmarse con certeza debido a que, como ya se mencionó, no se cuenta con datos de mediciones.

Por tanto, con las reservas del caso que interesa, puede aceptarse que las construcciones que posteriormente a la explotación se erigieron en las áreas minadas, pueden estar afectadas, por los movimientos que produce la extracción de materiales.

2.1.3) Colapsos

Es indudable que los peligros a que están sujetas las cimentaciones en las zonas minadas del Valle 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 anotadas 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 el proceso de alteración que reduce la resistencia de los materiales. Es claro que si la acción de los agentes externos es constante, el riesgo aumenta con el transcurso del tiempo. Esta tendencia se observa en las zonas minadas del Valle de México.

2.1.4) Aspectos Teóricos

2.1.4.1) Consideraciones previas

Las minas alojadas en el subsuelo de los lomeríos del poniente del Valle de México, muestran desarrollos geométricos muy variados, imposible de representar con fórmulas sencillas. Se acepta que las vetas atacadas por los mineros, son horizontales, de poco espesor, y se encuentran intercaladas con materiales de diversas compacidades.

En general los horizontes no son homogéneos en espesor ni en contenido y compacidad de sus materiales, ocasionando que el desarrollo de las galerías se torne caótico, en búsqueda siempre de los materiales de interés económico y de fácil ataque con herramienta de mano.

Con enfoque simplista pueden distinguirse dos condiciones en el desarrollo de galerías:

- a) galerías aisladas
- b) grupo de galerías

Para fines de esta exposición pueden considerarse como galerías aisladas, aquéllas que están separadas de otras la distancia suficiente para que no exista interacción apreciable de esfuerzos. Para este propósito parece razonable considerar separaciones de cinco veces la anchura media de las galerías, de centro a centro.

En general se tienen galerías aisladas cuando se construyen 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 comercial se aloja en franjas de anchura y espesor reducidos. (fig. 2.2)

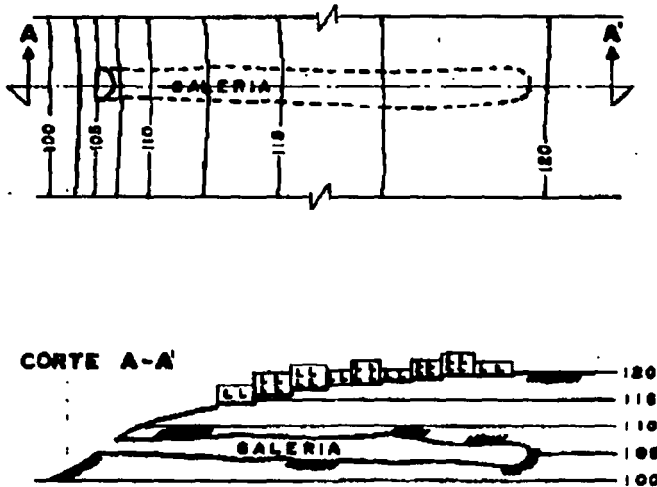


Figura 2.2 Planta y perfil de una galería aislada.

El grupo de galerías se produce en campos minados cuando las galerías provocan influencias de esfuerzos mutuas, por haberse construido con separaciones menores a cinco veces su anchura media. Esta condición es común en zonas mineras donde el material de interés económico tiene características razonablemente homogéneas. En esta explotación minera es necesario conciliar el volumen de material extraído, con los pilares de soporte mínimos que deben permanecer como refuerzo del área (figura 2.3).

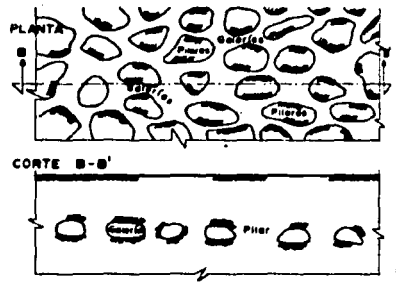


Figura 2.3 Planta y perfil de un grupo de galerías.

En la literatura especializada en minas de carbón a ese 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. Ambas condiciones se observan en las zonas de galerías múltiples en el Valle de México, pues las explotaciones se realizaron sin apego a ninguna técnica ni criterio, como los que ya se aplicaban desde el siglo pasado en otros países.

2.1.4.2) Alcance de la Teoría

Es difícil adaptar métodos de análisis teóricos a la estabilidad de bóvedas, ya que en general contemplan casos ideales donde la geometría de las oquedades y el comportamiento de los materiales siguen patrones simplificados, que distan mucho de presentarse en la realidad.

Esta aclaración, en lo que sigue intenta mostrar únicamente ideas generales de los cambios de esfuerzos que tienen lugar en el terreno por la construcción de galerías.

a) Galerías aisladas.

Esta condición es similar al caso de túneles, donde en base a la teoría de la elasticidad se puede explicar cómo se redistribuyen los esfuerzos en un medio elástico, alrededor de la excavación.

Para el caso de túneles profundos Terzagui considera un medio elástico, semi – infinito, cuyo peso volumétrico es γ , y emplea las fórmulas de Lamé para calcular el estado de esfuerzos en cilindros circulares de pared gruesa sujetos a presión interna. Después de un análisis relativamente sencillo concluye que el esfuerzo radial σ_r para el caso en que K_0 (relación entre el esfuerzo horizontal y el vertical) es igual a 1, es:

$$\sigma_r = D\gamma \left(1 - \frac{r_0^2}{r^2} \right) \quad (2.1)$$

Y el esfuerzo circunferencial:

$$\sigma_\theta = D\gamma \left(1 + \frac{r_0^2}{r^2} \right) \quad (2.2)$$

donde:

D profundidad media del túnel

r_0 radio del túnel ($D \gg r_0$)

r radio en el punto donde se analiza el esfuerzo

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

$$\begin{aligned} \sigma_r &= 0 \\ \sigma_\theta &= 2D\gamma \end{aligned}$$

es decir, si el túnel es circular, $K_0 = 1$, y no existe ademe, el esfuerzo radial en su pared vale cero, y el circunferencial, el doble del peso volumétrico multiplicado por su profundidad media.

En la figura 2.4 se observa la variación de los esfuerzos radial σ_r y circunferencial σ_θ al alejarse de las paredes del túnel.

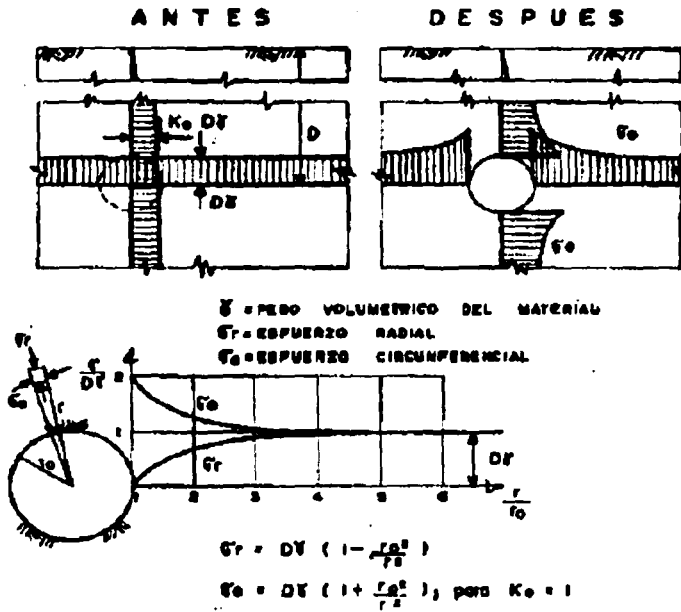


Figura 2.4 Variación de los esfuerzos radial y circunferencial cuando $K_0 = 1$

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 figura 2.5 muestra la variación de los esfuerzos circunferenciales σ_θ , en función de K_0 para dos puntos de un túnel circular: su clave ($\theta = 90^\circ$) y su línea media ($\theta = 0$).

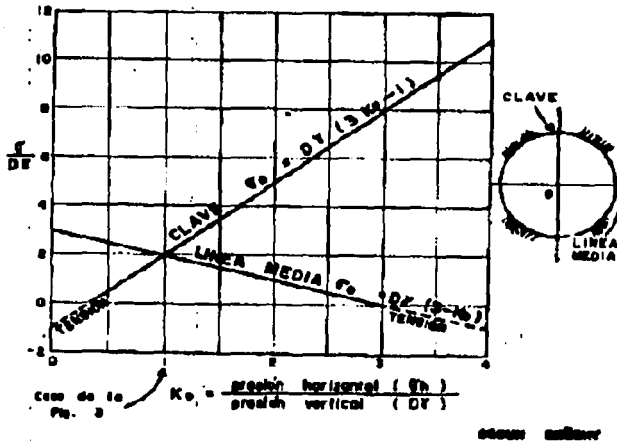


Figura 2.5 Variación de esfuerzos circunferenciales cuando $K_0 = 1$

Finalmente en la figura 2.6 se muestra la distribución de los esfuerzos circunferenciales en la pared de una galería de piso plano, paredes verticales, bóveda circular, para el caso en que $K_0 = 0.25$.

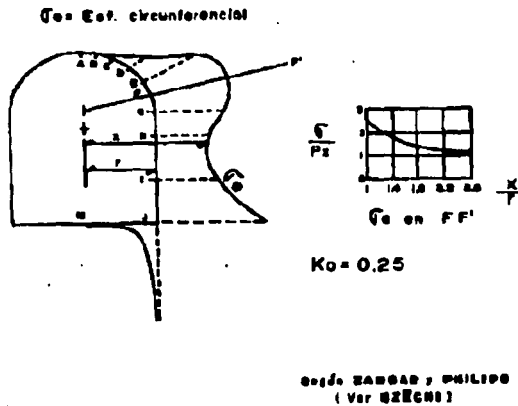


Figura 2.6 Distribución de esfuerzos circunferenciales en una galería cuando $K_0 = 0.25$

Si comparamos el esfuerzo circunferencial σ_0 máximo en las paredes de una galería cualquiera como la mostrada en la figura 2.6, con la resistencia a la compresión simple de los materiales que forman sus paredes, tendremos una estimación burda de su capacidad para mantenerse estable.

Cuando los esfuerzos circunferenciales s_0 en las paredes de una galería excavada en materiales 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 es función de la relación de esfuerzos actuantes y la resistencia del material. En la figura 2.7 se presenta una gráfica que permite estimar la magnitud de la zona plastificada para un material puramente cohesivo.

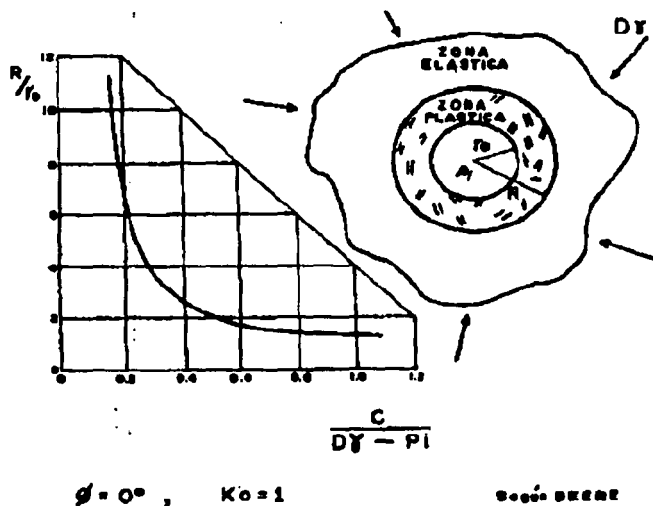


Figura 2.7 Radio "R" de la zona plastificada en función del radio r_0 del túnel.

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

Si las galerías se encuentran a poca profundidad no pueden aplicarse las fórmulas anteriores, ya que el "cilindro" no tiene pared gruesa en la clave. Para estos casos se sugiere considerar que la bóveda de la galería es una losa plana, cuya estabilidad puede valuarse con fórmulas similares a las empleadas para vigas. Por ejemplo, se propone que el claro máximo L que puede soportar en forma estable una galería es:

$$L = \sqrt{\frac{2\sigma T}{\gamma}} \quad (2.3)$$

o bien:

$$\sigma = \frac{\gamma L^2}{2T} \quad (2.4)$$

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.

b) Grupo de galerías

Cuando la explotación del material se efectúa a través de un campo de galerías que abarcan extensiones horizontales mayores que su profundidad, las ideas antes expuestas no se aplican ya que existe interferencia apreciable de esfuerzos entre ellas.

En esta condición la transmisión de esfuerzos de las bóvedas al piso tiene lugar a través de los pilares sin que tengan oportunidad de “puentearlos” ya que no hay material sólido para llevar a cabo tal distribución. Todo el peso del terreno más la sobrecarga que provocan las construcciones en superficie se trasmite íntegramente al piso de las galerías a través de los pilares.

Es de esperar que debido a heterogeneidades en la geometría de los pilares y en las propiedades mecánicas del material que los forma, algunos carguen más que otros e inclusive fallen 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, teniendo en mente 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 minas del Valle de México, es granular. Es necesario tomar en cuenta los efectos del intemperismo sobre las propiedades mecánicas del material de los pilares y en el comportamiento a largo plazo.

2.1.5) Migración de Cavidades

El fenómeno de migración es el resultado del desplazamiento o amplificación de una cavidad hacia la superficie del terreno, en forma de arco, por desintegración progresiva de la bóveda que la cubre. Este fenómeno adquiere importancia en materiales deleznable y se acelera cuando éstos sufren alteraciones como las provocadas por filtraciones.

La altura que una cavidad puede alcanzar por migración, suponiendo que el material desprendido queda en el lugar en donde cae, puede estimarse con la expresión:

$$h = H \left(\frac{\gamma_1}{\gamma - \gamma_1} \right) \quad (2.5)$$

donde:

- h altura total de migración
- H altura libre de la cavidad original
- γ_1 peso volumétrico del material desprendido
- γ peso volumétrico del material que forma la bóveda en estado natural

Es probable que la cavidad se comunique con el exterior si originalmente se localiza a una profundidad superficial o menor que la altura de migración. Esto se ha observado repetidamente en las minas del Valle de México, donde buen número de ellas se encuentran a poca profundidad. Sin embargo, en otras más profundas también se ha visto, en particular cuando son amplias, del tipo de salón, en las que el material desprendido se acomoda en un área más extensa al no encontrar confinamiento.

2.1.6) Influencia de sismos

Ocasionalmente se han observado otros efectos, por ejemplo, desprendimientos de bóvedas en el interior de minas y daños parciales de pilares como consecuencia de un sismo ocurrido entre dos visitas.

La experiencia acerca del efecto de los temblores en zonas minadas y en estructuras que sobre ellas se apoyan indica que el problema no es de gravedad. Sin embargo, se carece de un análisis de los hechos observados teniendo en cuenta propiedades de los suelos, geometría de las formaciones, características de construcciones cimentadas en las zonas en cuestión, lo que invalida la extrapolación de la experiencia y deja margen de duda.

Los fenómenos que interesan pueden esquematizarse como si constaran de cuatro tipos de efectos: modificación de espectros de temblores por presencia de cavernas, esfuerzos sísmicos directos en suelo minado, acción sísmica de estructuras sobre sus cimentaciones, y modificaciones por presencia de cavernas en las perturbaciones que experimentan las estructuras.

La energía sísmica que llega a la superficie libre del terreno es necesariamente menor en zonas minadas que en aquéllas que no lo están. Por otra parte, la presencia de cavernas disminuye tanto la masa media como la rigidez media en ciertos estratos. La reducción en rigidez es más pronunciada que la disminución en masa, por tanto habrá amplificaciones de ordenadas espectrales en la vecindad de ciertos períodos de vibración. Cabe esperar que en general los periodos dominantes en zonas minadas no pasen de una décima de segundo en vista del orden de magnitud de los espesores afectados.

Puede tenerse idea de los esfuerzos que inducen los sismos en techos de cavernas idealizando las ondas como planas. En estas condiciones, si c_p y c_s , son respectivamente las velocidades de propagación de las ondas P y S, las ecuaciones de onda se resuelven con cualesquiera funciones de $X \pm c_p t$ y de $X \pm c_s t$, donde X = coordenada espacial y t = tiempo. Las ondas P o primarias se forman por la compresión y dilatación del medio en cual se propagan y la vibración de las partículas sigue la dirección de propagación, en cambio, las ondas S o secundarias se forman por la reacción del medio ante las modificaciones por lo que no se propagan en medios fluidos y la vibración de las partículas es perpendicular a la dirección de propagación.

Una velocidad del terreno de 8 cm/seg en un suelo sano y firme del Distrito Federal, tiene un periodo de retorno de unos 100 años. Admitiendo amplificación de 2 por presencia de cavernas y velocidad de propagación de ondas S de 800 m/s, la deformación angular máxima resulta 0.02%. Esta cifra es muy inferior a la deformación angular de falla en tobas volcánicas. La deformación unitaria normal con igual periodo de recurrencia es bastante menor. Puede además estimarse esfuerzos en pilares de las minas a partir de consideraciones sobre el orden de magnitud de los desplazamientos del terreno. Sin haber realizado un análisis de esa índole, el resultado que hallamos para deformaciones angulares hace suponer que tampoco los esfuerzos en pilares serán de consideración. No es aventurado pensar que, en ausencia de construcciones sustanciales, la mina que falla durante un sismo habría fallado sin acción de temblores unos cuantos meses o años más tarde. Así pues no parece justificarse un análisis meticoloso de los

efectos mencionados, sino adopción en zona sísmica de criterios poco más conservadores que los que se juzgarán satisfactorios en ausencia de temblores.

Los cálculos que se estimen adecuados para diseño estructural suministrarán sin duda una precisión superior a la requerida para análisis de estabilidad de cavernas al cuantificar esfuerzos en el desplante de las construcciones. Tales esfuerzos por sismo consisten en cortante horizontal y compresiones verticales, éstas debidas a momento de volteo. El esfuerzo cortante horizontal es siempre una pequeña fracción de la presión de contacto media debida a la gravedad, pues la cortante basal se toma en diseño de la estructura como un coeficiente mucho menor que 1 por el peso de la construcción. Para ductilidades y flexibilidades usuales en edificios de cinco o seis niveles el esfuerzo cortante en cuestión puede ser del orden de 3% del peso de la obra. Si se ha cimentado sobre losa corrida, este esfuerzo puede ser 0.02 kg/cm^2 para un edificio de apartamentos de seis niveles y crece lentamente con la altura del inmueble. Si en la cimentación se usan zapatas aisladas con presión de contacto de 40 ton/m^2 el esfuerzo cortante en el desplante será del orden de 0.12 kg/cm^2 y tenderá a disminuir al aumentar la altura del edificio, por corresponder entonces a menores coeficientes de cortante basal. A mayores profundidades los esfuerzos cortantes en cuestión serán aún menores, así que este concepto no parece requerir atención especial.

Puede en cambio ser decisivo el incremento en compresión vertical por efecto de momento de volteo. Tal fenómeno fácilmente duplica las cargas de columnas en edificios esbeltos o provistos de muros o núcleos rígidos también esbeltos. Con mucho el momento de volteo es el fenómeno más crítico en estas condiciones.

Las irregularidades geométricas de zonas minadas seguramente hacen que el movimiento en la superficie libre difiera, mucha más que en zonas intactas, del movimiento de traslación horizontal uniforme que suele suponerse en diseño sísmico. Por tanto los llamados efectos accidentales (los que se desprecian en análisis elemental) podrán ser mucho más significativos en zonas minadas y ello habrá de tenerse en cuenta en diseño estructural.

En toda zona minada que haya sido tratada para lograr comportamiento adecuado ante cargas gravitacionales se habrán disminuido todos los efectos sísmicos que hemos mencionado, con frecuencia anulándolos.

2.1.7) Resumen

El análisis de estabilidad de cavidades contempla, por un lado, los asentamientos y desplazamientos que pueden ocurrir en la superficie del terreno, y su implicación con las construcciones que allí se encuentren, y por otro la falla por esfuerzo cortante de bóvedas y pilares con su consecuente hundimiento local, arrastrando las cimentaciones que eventualmente sean afectadas.

La experiencia europea en minas de carbón provee excelentes herramientas teóricas para cuantificar movimientos de la superficie del terreno cuando la explotación de la veta es total. Esto no puede aplicarse en las cavidades de las zonas minada del poniente del Valle de México, ya que aquí el ataque deja pilares de soporte. Es indudable que aunque el ataque en “cámaras y pilares” produce asentamientos de la superficie por “debilitamiento del subsuelo”, éstos son de menor cuantía y en general causan poco daño en construcciones normales.

En cambio las fallas por esfuerzo cortante de bóvedas y pilares pueden producir graves daños por los hundimientos locales de la superficie que engendran, ya que eso puede arrastrar el apoyo de la construcción en forma total o parcial.

El análisis de esfuerzos alrededor de cavidades ofrece una ayuda modesta para el problema aquí tratado ya que en general la geometría de oquedades y la heterogeneidad del subsuelo, condicionan fuertemente los esfuerzos en paredes y con ello la estabilidad general.

En el caso de los pilares, donde el análisis parece más sencillo, surge la incógnita del cambio de propiedades del terreno por intemperismo, y de la propia sección resistente del pilar por erosión progresiva.

Es indudable que en el caso real deben aplicarse los métodos teóricos como herramienta auxiliar de uso moderado, y basar la solución definitiva del problema en la inspección ocular directa y un buen criterio ingenieril.

2.2) Tratamiento de Terrenos Minados

Para resolver el problema de cimentaciones en terrenos minados del Valle de México, se han aplicado diversos procedimientos de acuerdo a las condiciones propias de cada caso y a las posibilidades y criterio de quienes lo han hecho. Esta situación, conduce a que los procedimientos aplicados y los resultados obtenidos, son heterogéneos.

Las formas más usuales de cimentación y de tratamiento de terrenos minados son las siguientes:

- a) Relleno de cavidades e inyección
- b) Derrumbe de minas, excavación y relleno compactado
- c) Refuerzo de techos y protección contra intemperismo
- d) Cimentaciones profundas

2.2.1) Relleno de Cavidades e Inyección

Esta forma de tratamiento del terreno de cimentación consiste en llenar ordenadamente las cavidades, empleando el material más económico disponible en el lugar, pero de resistencia adecuada. Su objetivo principal es reponer a la masa de suelo la continuidad y resistencia que tenía antes de excavar galerías en ella.

Es de esperarse que el relleno e inyección, además de llenar toda la cavidad, producirá cierta presión, para que entre en contacto con las paredes y techo de las galerías. Un efecto importante del relleno es el confinamiento que procura a las paredes y pilares entre salones, aumentando con ello su capacidad portante, sin embargo esta

operación no es suficiente para recibir las bóvedas, ya que es común que el material de relleno se contraiga; es pues necesario complementar el tratamiento con inyección a presión, e inclusive emplear aditivos expansores, en la última fase de llenado.

2.2.1.1) Etapas del tratamiento

En el proceso de relleno e inyección de cavidades se distinguen las siguientes cuatro etapas:

- a) Limitar el área por rellenar
- b) Colocar la mayor cantidad posible de material inerte en bloques, acomodados sobre el piso de las galerías y dejando entre ellos espacio de suficiente amplitud para que fluya el relleno.
- c) Verter desde el exterior un relleno fluido, que al fraguar adquiera la resistencia adecuada, procurando que llene primero las partes más profundas y bajas de las galerías.
- d) Inyección a presión de lechadas con aditivos expansores, para sellar los huecos más pequeños dejados por el relleno fluido al contraerse.

En la primera etapa hay que formar diques para lo cual pueden emplearse costales de yute llenos de arena o grava, piedra acomodada a mano o junteada con mortero, en fin elementos capaces de constituir represas o muros de retención que eviten la fuga de los materiales fluidos colocados en etapas subsecuentes.

En la segunda etapa pueden emplearse los materiales inertes y sanos producto de derrumbes que se encuentren en el interior de la cavidad, o bien que sean fáciles de introducir y acomodar. En todo caso, conviene emplear materiales de resistencia adecuada y que permanezcan estables a través del tiempo. Deben removerse del interior de la galería todos aquellos materiales como basura, lodo, materia orgánica y otros rellenos sueltos que no cumplan con los requisitos mencionados.

En la tercera etapa se efectúa el relleno masivo de la galería, utilizando mezclas de gran fluidez que al fraguar alcancen la resistencia especificada. Las propiedades del fluido deben ser acordes con el equipo y métodos de colocación. Si se emplean bombas, los agregados deben ser finos y de baja viscosidad; por el contrario, si se transportan con carretilla y se acomodan a mano pueden incluir agregados gruesos como boleos y fragmentos de roca. En esta etapa se requiere extremar los cuidados al seleccionar el material más económico, ya que su alto volumen de consumo repercute en forma directa en el costo global de la rehabilitación del terreno.

Entre los materiales que pueden mezclarse con agua en diferentes proporciones para fabricar mezclas fluidas, se tiene: cemento, cal, puzolana, mortero, grava, arena, tepetate, suelo del lugar, bentonita, aditivos fluidizantes, etc. Las proporciones entre los distintos componentes suelen establecerse por peso, si bien es más común determinarlas por volumen aparente.

Para un mejor control de la proporcionalidad debe conocerse la densidad de los sólidos por emplear, el peso volumétrico aparente y el porcentaje de humedad de los materiales. Por otra parte, además de la resistencia final de la mezcla, hay que controlar su viscosidad, estabilidad, conforme a las pruebas usuales.

La cuarta etapa se lleva a cabo una vez que el relleno ha fraguado y experimentado la contracción inherente a este proceso. Pueden emplearse entonces lechadas estables de gran fluidez, con aditivos expansores, colocadas a presiones que no excedan apreciablemente las debidas al peso propio del terreno, a fin de no ocasionar en él, desplazamientos y agrietamientos.

El proceso de relleno e inyección debe supervisarse en todo momento en sus cuatro etapas, y los resultados del tratamiento comprobarse mediante perforaciones que confirmen la consecución de los objetivos trazados.

En la figura 2.8 se presenta un croquis del procedimiento de llenado de una galería desde la superficie, haciendo énfasis en las cuatro etapas descritas.

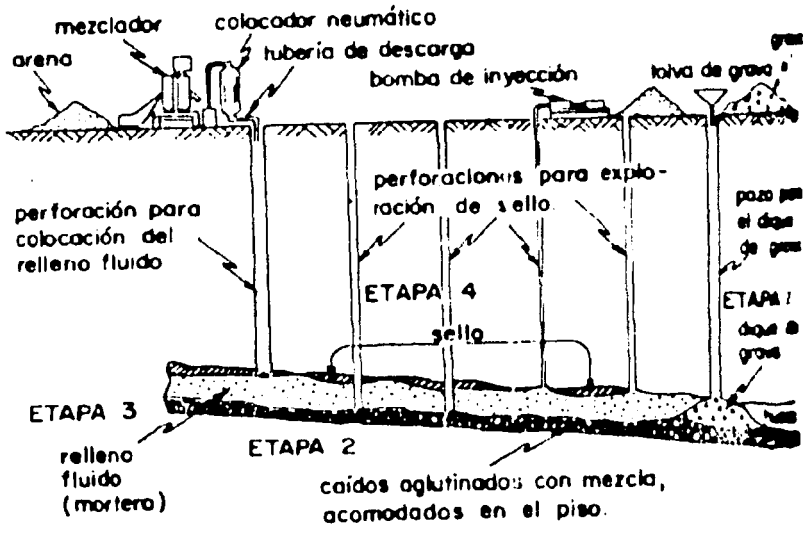


Figura 2.8 Sección transversal de una galería en la que se muestra el método de relleno a base de una mezcla de cemento y arena, inyectada a través de perforaciones.

En la figura 2.9 se esquematiza el procedimiento de relleno cuando el acceso de la galería es lateral.

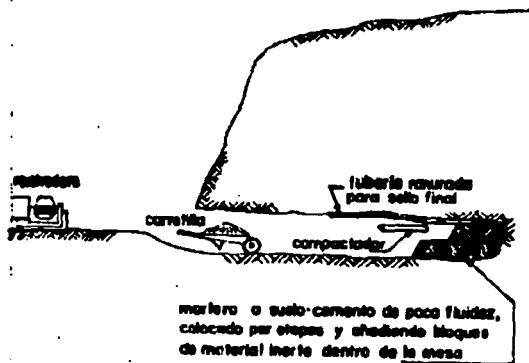


Figura 2.9 Relleno de galerías con acceso a nivel.

2.2.1.2) Aspectos prácticos

Una vez que se han elegido los materiales más económicos para rellenar las cavidades, deberá planearse cuidadosamente el método para su introducción y acomodo, para lo cual se requiere conocer la topografía de las galerías, en altimetría y planimetría, para localizar las perforaciones por las que se hará bajar el material y las lumbreras auxiliares a través de las que se controlará el proceso.

En la superficie del terreno se localizarán zonas para el almacenamiento de materiales y para el cementante o aditivos, protegiéndolos contra la intemperie.

Será necesario contar con equipo de mezclado adecuado a los materiales por manejar y con dispositivos para su dosificación por volumen o peso. Para su envío a la galería puede emplearse una bomba, ya que en general se 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.

Cuando el piso de las galerías es sensiblemente horizontal, conviene separar las diversas áreas por rellenar mediante muros de retención, como ya se indicó, a fin de llevar un control apropiado.

Las lumbreras de acceso deben localizarse en puntos estratégicos donde concurren dos o más galerías; su función, además de permitir inspeccionar y verificar el proceso, es dar seguridad al personal que trabaja en el interior de las galerías, proporcionar ventilación y facilitar la instalación de servicios como luz y teléfono.

En la figura 2.10 se presenta un esquema del procedimiento de relleno e inyección empleado en la zona poniente del Valle de México.

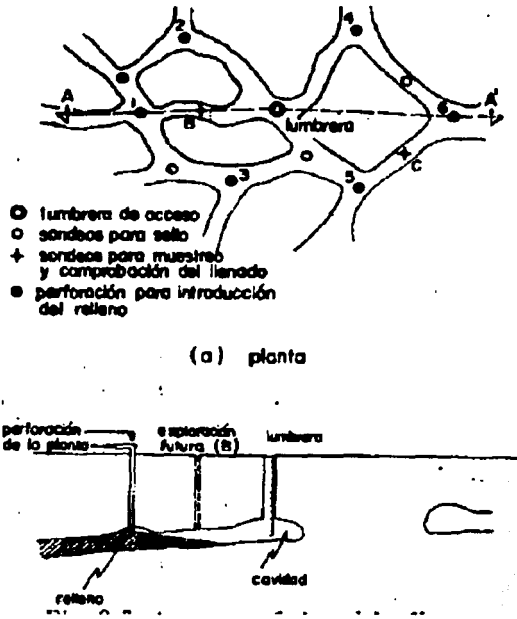


Figura 2.10 Relleno e inyección de cavidades.

2.2.1.3) Aspectos Económicos

El costo que implica el uso de rellenos e inyección varía considerablemente en cada caso particular, a causa de la influencia de diversos factores, como las instalaciones de obra que pueden representar un porcentaje importante del costo total, que aumenta a medida que los volúmenes de inyección son menores.

Sin embargo, el factor más importante en el costo lo representan los materiales que forman el relleno, por lo que debe procurarse utilizar el material del lugar. El cementante también es un factor importante que afecta directamente el costo.

En seguida se presenta un ejemplo en el que se estima la cantidad de materiales utilizando cemento para el relleno principal (tercera etapa) y mortero para la inyección de sello (cuarta etapa).

Cantidades necesarias por m³ de relleno:

Mezcla propuesta para la tercera etapa (relleno fluido)

Cemento	50 kg
Bentonita	25 kg
Tepetate	500 kg
Agua	300 litros

Para la cuarta etapa (inyección a presión)

Mortero	500 kg
Arena	500 kg
Agua	350 litros
Bentonita	25 kg

2.2.2) Excavación y Relleno Compactado

Una de las medidas aplicadas para regenerar terrenos minados, consiste en derrumbar los techos de las cavidades y rellenar el espacio comprendido entre el piso de ellas y la superficie del terreno, empleando material compactado, sin embargo, se tiene conocimiento de un buen número de casos, en los que la solución no fue apropiada por deficiencias de los procedimientos constructivos, lo que dio lugar a mal comportamiento de las cimentaciones apoyadas en estos rellenos. Por este motivo conviene tratar la solución con mayor detalle, se debe tener control riguroso de la compactación y no dejar oquedades.

2.2.2.1) Procedimientos Constructivos

El procedimiento utilizado con frecuencia consiste en derrumbar los techos empleando maquinaria, normalmente tractores equipados con arado. La secuela general es la siguiente:

- a) Localización topográfica de las cavidades en planta y perfil.
- b) Despalse del predio.
- c) Trazo en la superficie del contorno de las cavidades.
- d) Excavación con tractor, colocando el material extraído a un lado del área de cavidades. Deberá analizarse previamente el riesgo de que el equipo caiga en la cavidad al disminuir su techo, si es alto se empezará a excavar una pequeña fracción del área hasta alcanzar el piso de la cavidad, procediendo a continuación a demoler el techo de abajo hacia arriba, con ataque frontal o según convenga.
- e) Colocación y compactación del material de relleno en capas, a partir del piso limpio de las minas. En general, en la zona de lomas el material producto del derrumbe de techos, es de buena calidad para usarse como relleno.

También se han utilizado explosivos para derrumbar bóvedas, en este caso se requiere estudiar el número de barrenos y la cantidad de explosivos, lo que dependerá de la dureza del material. Este procedimiento requiere que no existan construcciones cercanas que pudieran dañarse, así como contar con los permisos especiales que el uso de explosivos exige.

En términos generales, para las tobas cementadas que comúnmente se encuentran en la zona de las lomas, una carga de 300 g/m^3 es suficiente para provocar el derrumbe de techos, si se utiliza dinamita al 60%. Sin embargo, la carga puede variar desde 100 g/m^3 para "aflojar el terreno" hasta 800 g/m^3 en conglomerados bien cementados.

Como ya se mencionó, uno de los problemas que suelen presentarse en las estructuras desplantadas sobre rellenos, es el debido a hundimientos diferenciales por insuficiencia en la compactación. También es muy probable que las estructuras queden desplantadas parte en relleno y parte en terreno natural, causando movimientos diferenciales. Entre mayor sea el grado de compactación alcanzado en los rellenos, menores serán los asentamientos.

En el caso de rellenos de mala calidad la solución más efectiva para evitar este problema, consiste en desplantar los cimientos bajo los rellenos, ligándolos con traveses cuando se trate de soportar las cargas transmitidas por muros o columnas intermedias, trabajando en forma de puentes como lo ilustran las figuras 2.11 y 2.12.

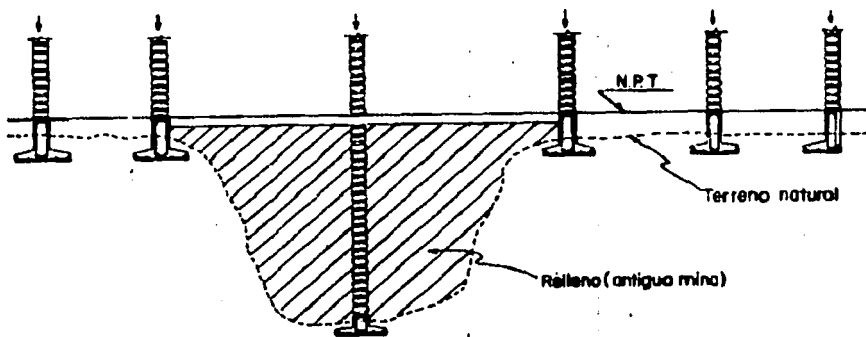


Figura 2.11 Desplante de una zapata bajo el relleno.

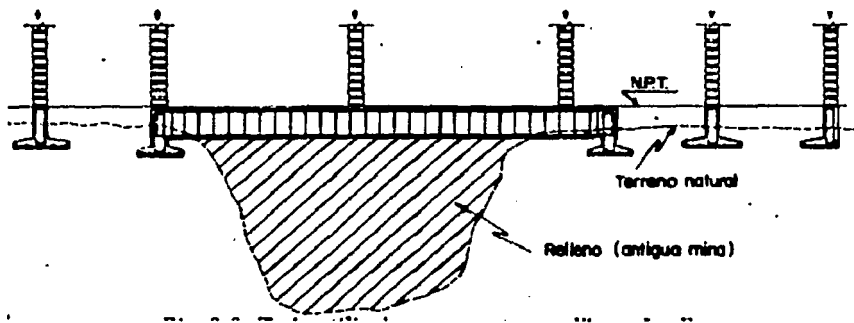


Figura 2.12 Trabe utilizada como puente para librar el relleno.

2.2.2.2) Rellenos sueltos y heterogéneos

Existen terrenos minados en los que el desnivel en la superficie producido por techos fallados en forma natural o artificial, ha sido rellenado con basura o materiales en forma inadecuada. Son frecuentes los rellenos formados por bloques desprendidos del techo original, superpuestos y con grandes huecos entre ellos, cubiertos por basura y otros materiales heterogéneos. La figura 2.13 ilustra esta irregularidad.

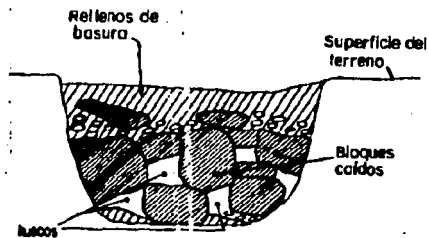


Figura 2.13 Relleno de una cavidad con bloques caídos del terreno original cementados con basura.

Ante estas condiciones nunca será aconsejable desplantar estructuras sobre estos materiales, pues los rellenos sujetos a la acción de filtraciones, del intemperismo, y otros factores, sufren alteraciones que se traducen en enjuntamientos y, por tanto, en hundimientos de la superficie y de estructuras. En ocasiones este efecto se ve agravado por el arrastre de partículas finas provocado por el agua infiltrada. Las soluciones adoptadas cuando se encuentra este tipo de problemas son las siguientes:

- a) Remoción de la basura y materiales sueltos hasta alcanzar el terreno natural del piso de la cavidad y relleno con materiales seleccionados y bien compactados.
- b) Desplante de la estructura hasta el piso de las cavidades, prolongando las columnas o muros de carga. Una variante de este procedimiento es construir traveses, los cuales "puentearán" la parte de la estructura ubicada en la zona de los rellenos.

La elección de una de estas soluciones dependerá del espesor, volumen y configuración de los rellenos y del tipo de las estructuras por construir, así como de la magnitud de los asentamientos tolerables, cuya predicción es incierta a partir de las pruebas usuales de laboratorio.

2.2.2.3) Alternativa de excavación sin relleno

En predios baldíos de gran extensión destinados en el futuro a uso habitacional, que abarquen 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, puede convenir abatir la superficie original por lo menos hasta el piso de ellas, sin el empleo subsecuente de rellenos compactados. Esta alternativa está condicionada a una configuración topográfica adecuada y a cumplir con los requisitos del proyecto urbanístico previo, así como al tiempo requerido para desalojar en forma económica los fuertes volúmenes del material excavado. La solución puede implicar cortes de gran altura en el perímetro, cuya estabilidad debe estudiarse.

Soluciones de este tipo se observan desde 1974 en algunas minas a cielo abierto que aún se explotan al poniente del Valle de México, donde también se ubican minas subterráneas.

2.2.3) Refuerzo de Bóvedas y Protección contra Intemperismo

En ocasiones, cuando se trata de galerías angostas o salones sostenidos por pilares del mismo material, se ha optado por reforzar la bóveda mediante un arco de concreto reforzado, o mediante muros de mampostería combinados con un recubrimiento para prevenir la intemperización de paredes y techos de galerías.

2.2.3.1) Formas de Refuerzo

Fundamentalmente existen tres formas de estructuración para recibir las cargas:

a) Muros de mampostería

Estos tienen por objeto reducir el claro libre de las cavidades para incrementar la capacidad para soportar cargas impuestas por las estructuras y la propia bóveda. Los muros se desplantan en terreno firme bajo el piso de las cavidades; en su parte superior debe garantizarse un buen contacto con la bóveda, pudiendo lograrse a base de “rajuela” de piedra y mortero con aditivo expansor. Como parte de esta solución se requiere 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 con concreto lanzado. La solución a base de muros de mampostería se empleó en una de las construcciones del Instituto Nacional de Protección a la Infancia, ubicado en la colonia Olivar del Conde.

b) Refuerzo de pilares naturales

En salones sostenidos por pilares se ha utilizado con éxito concreto o mampostería para reforzarlos, según se muestra en la figura 2.14. En esta solución también es indispensable recubrir paredes y bóvedas para evitar que se alteren.

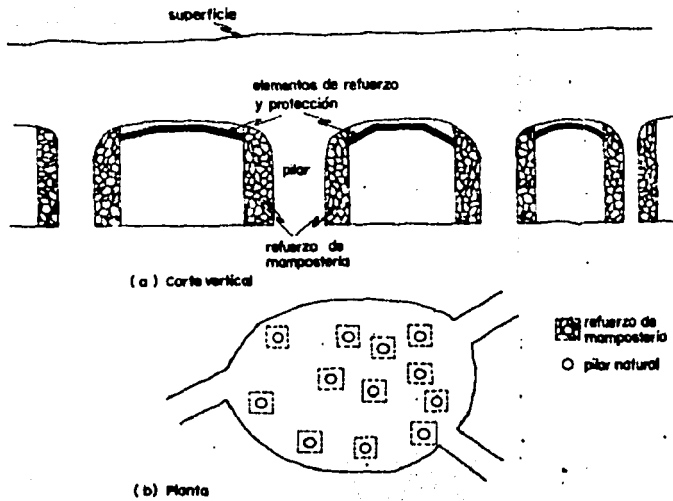


Figura 2.14 Refuerzo de pilares con mampostería.

c) Arcos o bóvedas de concreto

La utilización de arcos o bóvedas de concreto en galerías tiene por objeto mejorar la capacidad para soportar las cargas debidas a estructuras y al techo del terreno natural. Para valuar la carga a que estarán sujetos, considerando que su trabajo equivale al de un ademe, puede emplearse el criterio de Terzagui, aplicable al caso de suelos cohesivo – friccionantes. La expresión general es la siguiente:

$$P_b = B_1 \frac{\gamma - \frac{c}{B_1}}{K \tan \phi} (1 - e^{-k \tan \phi T / B_1}) \quad 2.5$$

donde:

P_b presión vertical sobre el ademe

$$B_1 = \frac{1}{2} B + H \tan(45^\circ - \frac{\phi}{2})$$

B anchura de la cavidad

H altura de la cavidad

γ peso volumétrico del material del techo

c cohesión del material del techo

K coeficiente empírico = 1

ϕ ángulo de fricción interna del material del techo

T Techo

e base de los logaritmos naturales

La figura 2.15 muestra un esquema de distribución de presiones en galerías.

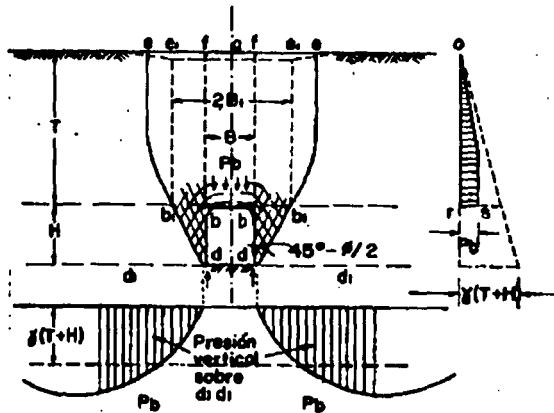


Figura 2.15 Distribución de presiones en una galería.

Si la bóveda va 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 este cálculo hay que considerar que dada la heterogeneidad de los materiales que componen la bóveda, la presión vertical no es uniforme.

Los arcos podrán apoyarse sobre muros de tabique o mampostería, que a la vez sirvan como elementos de protección contra el intemperismo de las paredes de las galerías.

2.2.3.2) Recubrimiento con concreto lanzado

Es posible que si la galería es profunda no afecte la estabilidad del terreno y de las construcciones, si se protege contra la acción del intemperismo para evitar el fenómeno de migración. En este caso, será posible recurrir al empleo de un recubrimiento a base de concreto lanzado, reforzado con una malla de acero.

La práctica permite establecer que son suficientes espesores de 5 a 10 cm del recubrimiento para proteger apropiadamente las paredes y techo contra el intemperismo. El empleo de un recubrimiento de concreto lanzado tiene limitaciones, razón por la cual antes de usarlo es necesario investigar las características del material de las paredes y clave de la cavidad, basándose en pruebas apropiadas.

También se requiere que las paredes de la cavidad sean capaces de soportar el impacto del concreto al momento de lanzarlo, y por otro lado, espacio suficiente para realizar la operación.

Un obstáculo adicional en el empleo de esta solución, lo representan las condiciones de flujo de agua a través del terreno, si las hay o llegaran a presentarse, ya que pueden producir el arrastre de materiales o una carga adicional por saturación del suelo que forma el techo de las galerías.

2.2.4) Cimentaciones Profundas

Cimientos profundos colados en sitio – pilas con o sin campana – se han utilizado en terrenos minados, desplantándolos en un estrato competente localizado bajo el piso de las cavidades y rellenos en edificaciones con altas descargas al subsuelo en las que la relación costo de cimentación contra costo total es baja, o cualquiera que sea cuando la construcción en un determinado predio es obligada y no es factible la aplicación de uno de los procedimientos descritos anteriormente.

El uso de cimientos profundos también exige un conocimiento detallado de la geometría y estado de las cavidades, así como de la estratigrafía y propiedades mecánicas del subsuelo.

La solución requiere asegurar la estabilidad del techo de la cavidad, ya que su falla es capaz de afectar la estructura. Como esto no es posible, salvo excepciones, el uso de pilas debe acompañarse de un tratamiento de las cavidades, que puede consistir en:

- a) empleo de relleno controlado e inyección, o b) muros para reforzar el techo de la mina.

En el primer caso (Fig. 2.16 a) debe considerarse la influencia del relleno en la presión efectiva al calcular la capacidad de carga; será función de D_1 si el techo llegara a gravitar sobre el relleno – cuando el tratamiento garantice un buen sello de contacto – por lo contrario, sólo lo será de D_2 . Estas consideraciones se basan en el supuesto de que la presión efectiva original (γD_1) se redujo a cero a nivel del piso de las cavidades, cuando éstas fueron excavadas e independientemente de sus dimensiones, restituyéndose en forma parcial o total por el peso del relleno y por la acción que éste pudiera ejercer en la bóveda. En vista de la naturaleza del terreno que prevalece en la zona de lomas, y el confinamiento del relleno controlado contenido en la cavidad, la capacidad de carga lateral de las pilas suele ser alta. Por los mismos motivos es aceptable en el diseño el considerarlas como elementos cortos.

En pilas construidas a través de cavidades sin rellenar (Fig. 2.16 b), incluyendo la alternativa de muros para reforzar la bóveda, la presión efectiva será función de la profundidad de desplante D_1 bajo el piso.

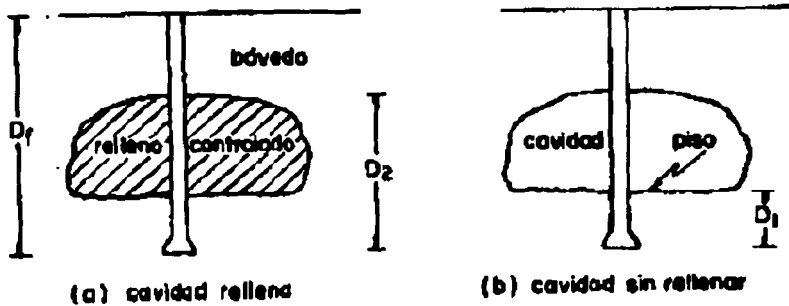


Figura 2.16 a) Relleno controlado en una cavidad. b) Muro en una cavidad sin relleno.

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

Construir pilas a través de cavidades sin rellenar requiere el uso de camisas en el espacio libre, lo que encarece la solución. Debido a que el nivel freático se encuentra a gran profundidad en la zona de Lomas y a que las paredes de las perforaciones se sostienen sin el empleo de ademes o lodos, los procedimientos constructivos son sencillos y corresponden con los usuales del nombrado "método seco".

Las losas como elementos de piso de planta baja, pueden requerirse bajo ciertas circunstancias, 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 de baja a nula contribución para soportar fuerzas horizontales.

Ya que se han mencionado algunas consideraciones relativas a capacidad de carga, es oportuno agregar, por la frecuencia con que se encuentran formaciones de material

pumítico en la zona de Lomas, la marcada influencia que tiene la rotura de los granos que lo componen en la compresibilidad y resistencia al corte. Marsal, en su publicación "El Subsuelo de la Ciudad de México", plantea este problema que por ser poco conocido, en general no se toma en cuenta al proyectar cimentaciones en esa zona.

2.2.5) Comentarios

En este subcapítulo se han presentado cuatro formas principales para cimentar y tratar el subsuelo minado de los lomeríos del poniente del Valle de México, incluyendo algunas variantes. Todas constituyen soluciones complicadas y costosas.

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 las cavidades, y por otro, al tipo y características de la obra o del inmueble afectado. En la tabla siguiente 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 ya mencionados en este subcapítulo, y los que se agregan al calce de la tabla.

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, es el señalado en primer término en la tabla, o sea utilizar el 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.

Tabla 5. UTILIZACIÓN VARIABLE DE LAS FORMAS DE CIMENTACIÓN Y TRATAMIENTO DEL SUBSUELO EN ÁREAS MINADAS CONSTRUIDAS O POR CONSTRUIR.

Método	Áreas extensas (colonias)		Áreas reducidas (predios)	
	Construidas	Por construir	Construidas	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 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 e 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.

Toda solución debe apoyarse en un estudio minucioso de la geometría y del estado de las cavidades, así como de la estratigrafía y propiedades del subsuelo. En el caso de predios localizados en un área minada, debe contemplarse la extensión de los estudios y del tratamiento de la cimentación hacia los predios vecinos y preferentemente en toda el área, en virtud del costo y seguridad del conjunto y de la propia obra. Si esto no es

posible, si 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.

2.3) Conclusiones y Recomendaciones Generales

Debido a la importancia del tema, se juzgó conveniente hacer un resumen general que incluyera aquéllos puntos de vista de mayor relevancia, y agregar una serie de conclusiones y recomendaciones.

2.3.1) Conclusiones

a) Importancia del Problema

Los daños materiales y los que afectan de modo directo al ser humano que implica la falla de terrenos minados localizados en la zona de Lomas del poniente del Valle de México, se advierten en todo momento. Las anomalías o fallas suelen ser imprevisibles, y sus consecuencias están representadas por hundimientos súbitos de gran magnitud, al ceder el techo, pilares y paredes que las conforman, por causas diversas.

b) Origen de las minas

Las minas subterráneas, son el resultado de la explotación rudimentaria que el hombre llevó a cabo en el pasado, por desgracia todavía hasta hace unos años, sin apego a un procedimiento razonable o a un control que previera sus repercusiones en el futuro, al irse extendiendo el área urbana hacia esos lomeríos, ni se tomaron providencias durante su explotación aún en los casos en que ocurrieron fallas del terreno.

Las minas se desarrollan en forma de galerías y salones, en mantos sensiblemente horizontales en los que predomina material pumítico; forman a menudo redes muy complejas en planta, y de extensión variable que en ocasiones constituyen verdaderos túneles que cruzan las lomas de un lado a otro. En casi la totalidad de ellas el acceso fue

lateral y se localizó en las laderas de las barrancas que surcan las lomas, debido a la facilidad que representó para los mineros el descubrimiento de los mantos y la extracción de los materiales que les interesaba. Por ello es que las minas se encuentran a escasa profundidad de la superficie, sin exceder el fondo de las barrancas. Cuando en las laderas se detectó más de un manto aprovechable, la explotación se hizo en varios niveles, por lo que ahora existen áreas minadas de un nivel, de dos y hasta de tres.

c) Ubicación y extensión

La información con que se cuenta sobre áreas afectadas es en realidad escasa, más aún en lo que toca al Estado de México, por falta de censos; sin embargo, se conoce que existen, entre otras, en fraccionamientos como Lomas de Tecamachalco, La Herradura, Bulevares, Lomas Verdes, Las Alamedas, así como en áreas por ahora más o menos alejadas de la zona metropolitana.

d) Geología, estratigrafía y propiedades

El conocimiento de la geología, estratigrafía y propiedades de los suelos de los lomeríos del poniente del Valle de México, es de gran utilidad para la localización de antiguas minas, pues constituye la base para identificar las capas de la Formación Tarango en las que se desarrollan, así como los materiales que las forman y que fueron objeto de explotación. Por otra parte, proporciona datos que orientan el estudio de cimentaciones, permitiendo establecer programas exploratorios y de investigación de campo y de laboratorio más acordes con la realidad.

e) Exploración

La complejidad de las minas subterráneas, agravada por la falta de información histórica, por la alteración que ha sufrido el subsuelo y por la presencia de construcciones que modifican la superficie original del terreno, dificultan su localización, levantamiento y determinación de su estado interior. Dependiendo del grado de dificultad, la investigación de cavidades puede apoyarse en diversos métodos

de los que dispone la Geotecnia, siendo, según el caso, algunos más apropiados que otros.

Los programas de exploración y métodos a emplear deben plantearse en base a las condiciones propias de cada caso y están sujetos a ajustes conforme a los resultados y observaciones que vayan determinándose en la etapa de investigación, pudiendo variar ampliamente los programas finales de los iniciales, no sólo en los métodos y extensión, sino también en el costo.

La investigación de un terreno minado debe iniciarse con un reconocimiento minucioso del área, observando la geología, la posible presencia de bocaminas o de indicios que acusan la existencia de oquedades, auxiliándose con información lo más fidedigna posible obtenida de los antiguos moradores. Las fotografías aéreas de algunas áreas con las que se cuenta desde los años cuarentas, constituyen una valiosa ayuda para la búsqueda de bocaminas y para conocer las transformaciones ocurridas en la superficie del terreno a través del tiempo.

La investigación de las minas, además de ser difícil, resulta peligrosa por la inevitable necesidad de internarse en muchas de ellas para obtener la información detallada requerida para estudiar y tratar de solucionar el problema. El detalle sólo puede lograrse mediante métodos directos (topografía), o bien recurriendo a métodos más complicados hasta ahora usados en el medio, como la fotografía subterránea efectuada desde la superficie.

Cuando el levantamiento directo no es posible al principio de una etapa intermedia de la investigación, habrá que auxiliarse de los métodos semidirectos (perforaciones) o indirectos (geofísica). Estos sólo proporcionan información a lo largo de líneas o de planos verticales, a partir de los cuales puede iniciarse o continuarse el levantamiento directo, a través de perforaciones "tamaño hombre" practicadas en los sitios de anomalías.

Es importante aclarar que el alcance de los métodos semidirectos e indirectos está limitado a comprobar la existencia o no de oquedades, y que no proporcionan el detalle necesario de las dimensiones y forma, a menos que fuera a costa de una exploración exhaustiva y muy costosa, que aún así pudiera ser poco eficaz. Por ello se insiste en la necesidad de aplicar en todo lo posible los métodos directos.

La profundidad de investigación debe alcanzar por lo menos el nivel más bajo del piso de las cavidades, limitándose a la del fondo de las barrancas.

Explorar con muestreo puede ser útil para complementar la información obtenida de la geología superficial, así como para determinar en el laboratorio las propiedades de los suelos para fines del proyecto de las cimentaciones.

f) Estabilidad de terrenos minados

En la estabilidad de las cimentaciones intervienen las dimensiones, profundidad y forma de las cavidades, las propiedades y naturaleza de sus techos, pilares y paredes, así como la magnitud de las sobrecargas. Pero la experiencia demuestra que el principal factor será representado por los agentes del intemperismo y erosión, especialmente el agua infiltrada que debilita los suelos y provoca fenómenos como el de migración.

La complejidad geométrica de las galerías y salones, la evaluación de las propiedades mecánicas de los suelos, la estructura secundaria de las formaciones, la influencia de los agentes del intemperismo y la imposibilidad de predecir otros factores, dificultan y hacen impracticable, si no imposible, cualquier análisis tendiente a determinar el estado de esfuerzos y deformaciones, salvo casos excepcionales. Sin embargo, el conocimiento teórico facilita el entendimiento físico del problema y los mecanismos de falla, de utilidad en la toma de decisiones, que dependerá de modo fundamental del criterio del ingeniero. Esta situación obliga, en general, a soluciones conservadoras.

g) Cimentaciones

Cuatro formas principales de cimentación y de tratamiento del subsuelo, incluyendo algunas variantes, se presentan como viables en el caso de terrenos minados del poniente del Valle de México, a saber: 1) relleno de cavidades e inyección, 2) excavación y relleno compactado, 3) refuerzo de techos y protección contra el intemperismo, 4) cimentaciones profundas. Todas ellas representan soluciones costosas en las que la relación costo de cimentación contra costo de las obras en proyecto o de inmuebles existentes, es alta; por un lado depende de la extensión del área y características del terreno minado y, por otro, del tipo de las obras por erigir o existentes. Esa relación es muy alta en el caso de terrenos minados ocupados por asentamientos humanos compuestos por vivienda de condición muy precaria y carentes de obras de urbanización y de servicios municipales, en los que la solución constituye un problema económico serio.

La elección de una de las formas de cimentación depende fundamentalmente de las condiciones imperantes en cada caso; excepto el tratamiento de cavidades a base de rellenos e inyección que puede aplicarse en cualquier caso, aunque en ocasiones, puede ser prohibitivo en predios pequeños destinados a casas. En áreas extensas como colonias o fraccionamientos construidos, prácticamente constituye la única solución, sobre todo si el terreno denota un marcado estado de alteración. En este caso el tratamiento puede consistir en el uso de morteros vaciados por gravedad y de lechadas estabilizadas inyectadas a presión. Especial atención debe prestarse a las proporciones y componentes de las mezclas, no solo por requisitos de resistencia y facilidad constructiva, sino también por el costo que representan.

Las cimentaciones profundas se han empleado en contadas ocasiones, acompañadas de tratamientos (relleno controlado o refuerzo con muros) que aseguren la estabilidad de los techos de las cavidades. El tipo de tratamiento y su eficacia implica ciertas consideraciones en el diseño y construcción.

2.3.2) Recomendaciones

a) Reconocimiento de otras áreas minadas

La ubicación y extensión de las zonas minadas se ha determinado en parte en el Distrito Federal, pero prácticamente no sucede así en el Estado de México. En el primero, es necesario continuar los trabajos de reconocimiento, tanto en áreas habitadas como baldías, para completar la información que se tiene a la fecha. En el Estado de México deben iniciarse los estudios desde sus raíces.

Los trabajos que involucra el reconocimiento – inspecciones en el lugar, uso de fotografías aéreas, delimitación de áreas, interpretación, conclusiones y recomendaciones -, requieren de tiempo, y como el problema no sólo crece sino que se agrava con el transcurso del mismo, dichos trabajos deben realizarse de inmediato.

b) Estudios de detalle

A partir de la información obtenida durante los reconocimientos, es posible establecer órdenes de prioridad de los estudios de detalle que deban realizarse en las colonias y fraccionamientos afectados, en base a los métodos reseñados en esta tesis, debiendo ser del alcance suficiente para evaluar lo mejor que se pueda el problema y darle la solución correcta.

c) Medidas que deben adoptarse en áreas extensas regularizadas

El estudio y solución correcta del problema de cimentaciones en terrenos minados cuyo destino sea establecer colonias y fraccionamientos autorizados, debe exigirse a los fraccionadores, como parte de su obligación de proporcionar servicios y obras de infraestructura urbana seguras para los futuros habitantes, esto se insiste, en el caso de nuevas áreas habitacionales. En aquéllas ya ocupadas por inmuebles debe obligárseles a que rehabiliten los terrenos.

Las soluciones deben orientarse a resolver apropiadamente el problema en la total extensión del área que se trate, agotando toda posibilidad de riesgo o incertidumbre. Medidas insuficientes en estudios y soluciones, sea por descuido, deficiencia ingenieril o economía mal entendida, deben ser categóricamente inaceptables y en consecuencia desechadas.

d) Medidas en construcciones individuales

Las edificaciones individuales en áreas minadas cuya cimentación preferentemente debe resolverse como parte de un conjunto, pueden llevarse a cabo como antes se expresó, cumpliendo con los requisitos de estudio y solución. Sin embargo, tienen el inconveniente de que dan lugar a ocultar y perder toda falla en el futuro sobre el desarrollo de las minas hacia predios vecinos, por lo que es obligado que los estudios abarquen una extensión mayor que la del predio, con objeto de que esta información se conozca y sea útil a los habitantes de inmuebles existentes o de los futuros ocupantes, de forma tal que les permita encauzar por buen camino los estudios. Por el elevado costo de éstos y de las soluciones, es recomendable que ambos abarquen la mayor extensión posible del área.

Al construir se debe asegurar que la falla de terrenos vecinos o cercanos sin tratar, no dañen a la propia obra. Esto significa contar con una información del subsuelo de gran amplitud. Por los motivos señalados se insiste en la consistencia de estudiar y reacondicionar áreas de fraccionamientos, colonias y predios de gran extensión.

e) Uso de predios baldíos

El desmedido crecimiento hacia los lomeríos del poniente del Valle de México debe regirse y controlarse, de forma tal que se prohíban construcciones o asentamientos humanos por lo menos en las zonas minadas. En este sentido la reglamentación del uso del suelo tiene injerencia definitiva, pero necesita hallarse en la clasificación de las áreas en cuanto a la presencia o no de minas subterráneas. Debe impedirse por algún medio la invasión clandestina de terrenos minados que con toda seguridad en el futuro

se conviertan en un problema más de los que ya existen. Terrenos minados y formados por rellenos, así como los cercanos a cortes de gran altura cuya estabilidad sea dudosa, deben destinarse a otros usos diferentes al habitacional, de los cuales seguramente hay varias opciones que además por motivos urbanísticos, se justifican en las zonas del poniente, dado el exagerado hacinamiento humano y la falta parcial o total de servicios municipales en buen número de ellos.

Finalmente, si bien la Geotecnia como parte que es de la Ingeniería, proporciona los conocimientos y herramientas necesarias para el estudio y solución del problema de cimentaciones o recimentaciones en terrenos minados, su aplicación sobre todo en colonias de condición precaria, requiere del interés de los habitantes, y en particular de las autoridades, pues la especialidad queda comprendida en un marco en el que intervienen aspectos económicos, sociales y políticos, los cuales juegan un papel definitivo que sin su participación decidida y activa no es posible resolver el problema. En caso contrario, este problema no sólo continuará existiendo sino que se agravará por el incremento del número e intensidad de fallas y por extenderse a zonas minadas por ahora deshabitadas, cuyo futuro se desconoce.

CAPÍTULO 3

PROCEDIMIENTO DE REDUCCIÓN DE RIESGOS

3.1) Antecedentes

En este capítulo se abordará el procedimiento de reducción de riesgos más adecuado para las zonas minadas ubicadas en el Municipio de Atizapán de Zaragoza, ya que los asentamientos humanos existentes se encuentran en constante peligro por las condiciones prevalecientes en las cavidades subterráneas identificadas hasta el momento, de las cuales se estima un volumen a rellenar de 113,270 m³. Por lo tanto, el objetivo de este capítulo consiste en establecer el mejor método para la detección de cavidades subterráneas de origen artificial; definir su caracterización, determinar entre los métodos de reducción de riesgos el más factible, atendiendo a las condiciones propias de la cavidad, del sitio donde se ubica y de los aspectos sociales.

El Municipio de Atizapán de Zaragoza se ubica al norte de la Ciudad de México, al pie de la Sierra de las Cruces, geotécnicamente se encuentran suelos característicos de las zonas denominadas de Transición Alta y de Lomas. La geomorfología reciente es resultado de numerosos eventos eruptivos, los cuales depositaron grandes cantidades de material al pie de los conos volcánicos; arenas de composición andesítica, arenas constituidas de pómez, cenizas volcánicas y tobas volcánicas.

Tales depósitos dieron forma a numerosos abanicos aluviales orientados al NE, los cuales fueron objeto de explotación minera durante las décadas de los 60's y 70's y parte de los 80's. La falta de control durante la extracción generó que se realizaran túneles en forma anárquica de los cuales no se dejaron planos. Frente a la demanda de tierra para vivienda popular en la Ciudad de México los predios de Lomas Lindas en 1992 y otros que le siguieron, alertaron a las autoridades revelando el problema a la población en general.

Ante la presión ejercida por la ciudadanía, el Gobierno del Estado de México reaccionó asignando recursos para la reducción de riesgos, se empleó un procedimiento de revestimiento de túneles con lanzado de concreto y colocación de marcos estructurales de concreto armado. Por su alto costo, el procedimiento no sirvió más que para atender unos cuantos sitios, en 1996 el programa termina, quedando sin atender minas por más de 113,270 metros cúbicos. El problema fue reducido de modo parcial ya que los revestimientos colocados deben estar sujetos a una supervisión permanente y a un mantenimiento continuo.

Considerando que un gran número de ciudadanos del Municipio están expuestos al riesgo y tomando en cuenta las limitaciones presupuestales, la administración municipal se dio a la tarea de encontrar una solución que fuera factible para las condiciones del Municipio. La primera acción consistió en integrar dentro de la Dirección de Protección Civil, Ecología y Bomberos a un grupo de especialistas en Geotecnia, quienes se dieron a la tarea de investigar y desarrollar un proceso de reducción de riesgos. Se revisaron casos similares en Europa y se analizó información de universidades en México, Estados Unidos, Australia y Japón.

Después de estudiar el problema con una visión de cambio, se llega a la conclusión de que evitar la subsidencia de las minas colocando revestimientos de concreto resulta impráctico por su alto costo inicial y por el mantenimiento al que debe sujetarse, una solución eficiente que ha dado muy buenos resultados, es restaurar el suelo regresándolo, hasta donde sea posible, a su estado original. Para ello se coloca un relleno que permite la transmisión de esfuerzos así como asentamientos elásticos dentro de rangos admisibles para las cargas inducidas.

Se denominan zonas de riesgo aquellas regiones en las cuales puede presentarse en forma por demás repentina fracturas, o rupturas con derrumbe del conjunto, piso y construcción. A continuación se muestran algunas fotografías de edificaciones que han sido afectadas por la existencia de alguna cavidad (Fotografías 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5 y 3.6).

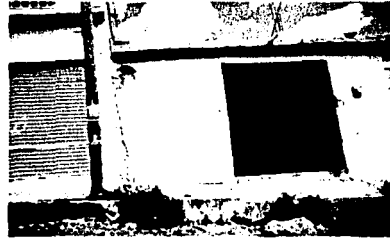


Foto 3.1 Tomada en la Colonia 5 de Mayo. Puede observarse el daño causado por la presencia de una cavidad en el subsuelo, el asentamiento se presenta del lado izquierdo de la construcción, en este caso la cavidad se localiza a 19 metros de profundidad, actualmente está en la etapa de exploración.



Foto 3.2 Se pueden observar los daños causados por la presencia de otra cavidad en el subsuelo, la cual está siendo tratada, su profundidad es menor y presenta bocamina.



Foto 3.3 Construcción localizada en la Colonia Calacoaya, se pueden observar los daños causados a la estructura por la presencia de cavidades subterráneas.

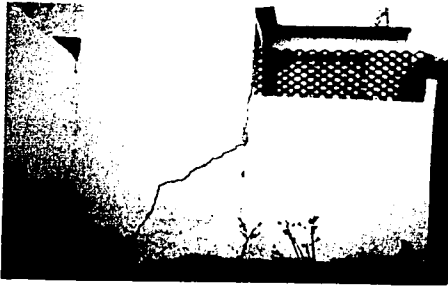


Foto 3.4 Esta construcción se localiza también en la Colonia Calacoaya y se ha visto afectada por la presencia de cavidades en el subsuelo.



Foto 3.5 Tomada cuatro meses después con respecto a la anterior, y se puede observar el avance de los daños.

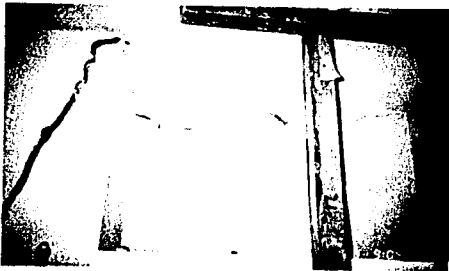


Foto 3.6 Se pueden apreciar los daños en el interior de una vivienda, causados por la presencia de cavidades en el subsuelo, de manera que fue necesario apuntalar la estructura.

Para comprender mejor lo que significa una zona de riesgo, y como una ampliación a lo ya expuesto, debemos conocer primero el mecanismo de migración de una cavidad, el cual consiste en lo siguiente:

- Existen factores que producen el agrietamiento del techo de la cavidad, tales como: las vibraciones causadas por la actividad citadina y sismos, cargas producidas por construcciones y vehículos, peso propio del material. (Figura 3.1)

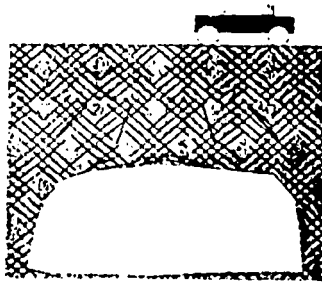


Figura 3.1 Carga producida por vehículos.

- Una vez agrietada se desprenden algunos fragmentos (Figura 3.2)



Figura 3.2 Fragmentos desprendidos del techo de una cavidad.

- Los desprendimientos continúan y amplían la cavidad (Figura 3.3)



Figura 3.3 Ampliación de cavidad debida a los desprendimientos.

- Los desprendimientos se detienen hasta que se forma un arco natural (Figura 3.4)

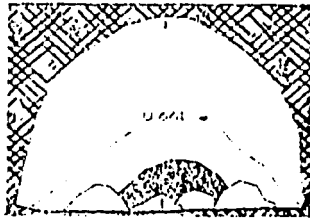


Figura 3.4 Arco natural.

- Si la migración deja un espesor menor de 3 m es muy probable que con el paso de los vehículos, esfuerzos que producen las construcciones, alguna fuga de agua o sismo, se produzca el hundimiento de vehículos y construcciones (Figura 3.5).

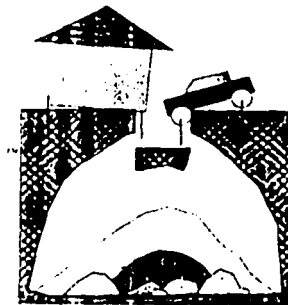


Figura 3.5 Hundimiento de vehículos y construcciones.

- En algunas ocasiones la migración de la caverna alcanza la superficie produciendo el hundimiento de vehículos y construcciones (Figura 3.6).

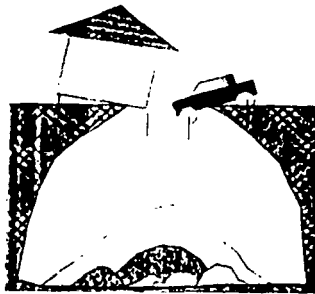


Figura 3.6 Migración de una caverna hasta la superficie.

3.1.1) Geología del Lugar

La zona se encuentra conformada por materiales piroclásticos de composición principalmente andesítica a riolítica, característicos de la Formación Tarango. En la porción superior se asienta un horizonte tobáceo de grano fino a medio, con un espesor que varía entre 5 y 25 m que está sobreyaciendo a una capa de arenas pumíticas con algún contenido de mica negra.

Toda esta secuencia se encuentra generalmente semiconsolidada. El horizonte arenáceo se puede determinar por correlación con otras áreas similares de la región, y es posible asumirle un espesor variable entre 3 y 6 m.

El horizonte pumítico fue explotado siguiendo su echado natural que se estima entre 15 y 25 grados. Lo anterior dio lugar a la conformación de cavidades con geometría irregular en túneles sin dirección específica. Se extrapola de otras zonas, una dimensión seccional de los túneles de dos por dos metros en ciertas regiones hasta cuatro por seis

metros en otras con posibles claros de mayores dimensiones en el cruce de dos o más de ellos.

Para tener una idea más clara de la localización de esta zona y los materiales que ahí se encuentran se proporciona el siguiente mapa geológico (Figura 3.7).

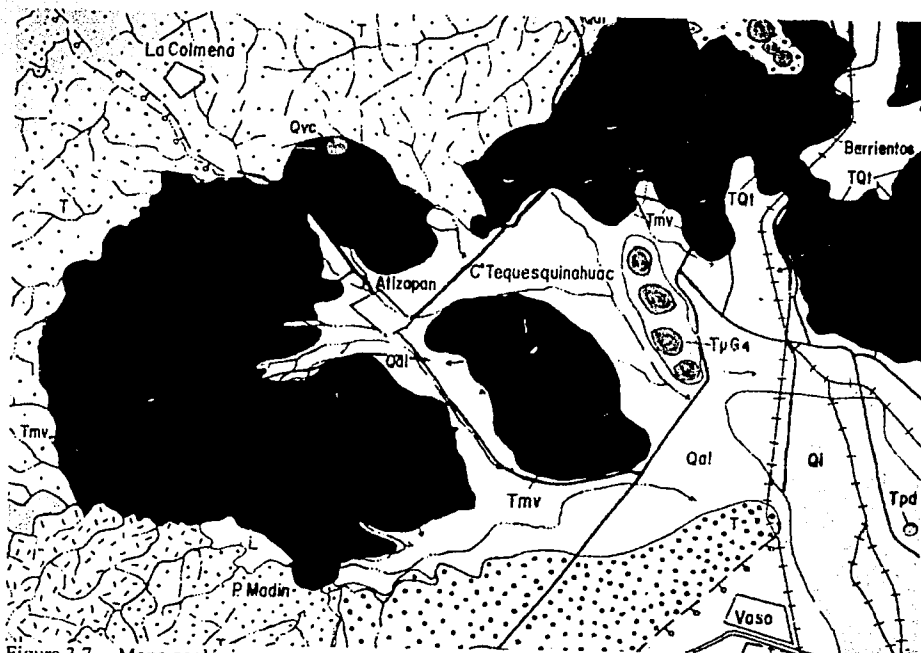
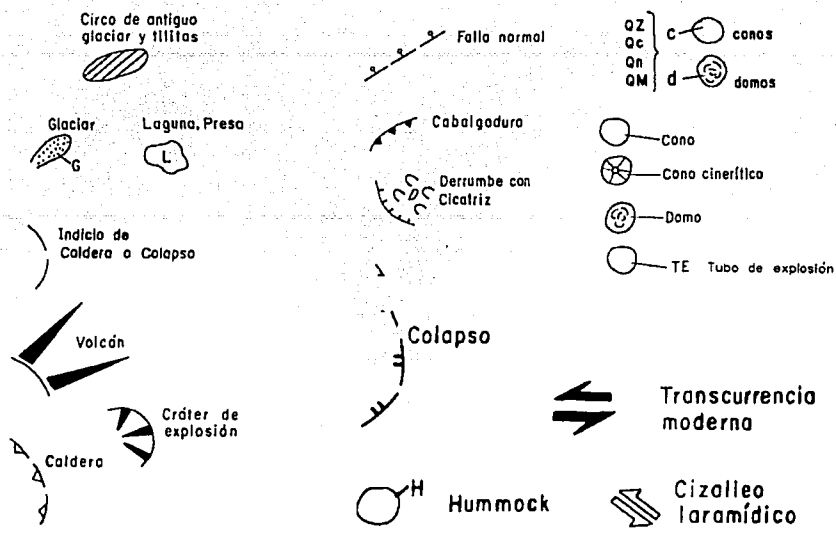


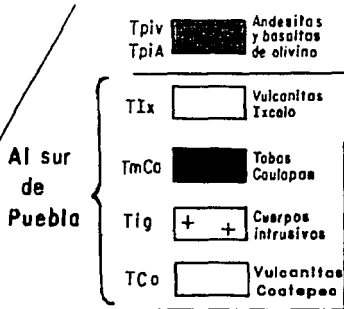
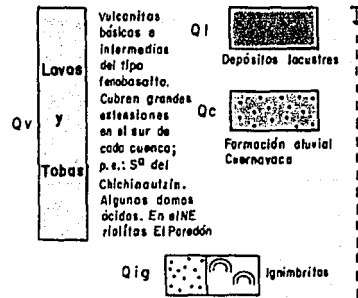
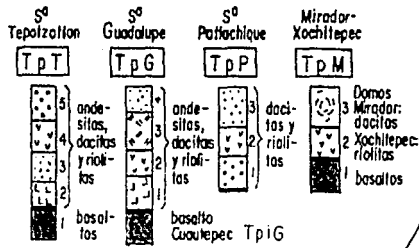
Figura 3.7 Mapa geológico



Qal		Depósitos aluviales
Qial		Depósitos aluviales antiguos
Qtr		Terrestres
Qel		Tabas en depósitos de flancos
Qt		
Qtl		
Qiv		Vulcanitas intermedias y básicas Q.N.: riolitas C ^o Navajas
Tpz		Lahares: Formación Tepetzteco
Tpv		Vulcanitas ácidas intermedias en estratificaciónes menores. Algunos lavas básicas: Tpb
TpL		Depósitos lacustres en cuencas extensas Taximay - Tlaxcala
Tp7		Ignimbritas Zumate
Tmv		Vulcanitas, principalmente ácidas

Simbología

CUATERNARIO		Tov		Vulcanitas, principalmente intermedias	EOCENO OLIGOCENO SUP
		Teob		Conglomerados Balsas y El Morro	
PLIOCENO		Ks		Formaciones marinas: Méndez, Mezcala, San Felipe y Agua Nueva	CRETACICO
		Ki		Formaciones marinas: Morelos, Orizaba, El Doctor y Xochicalco (Kix)	
		Kim		Formaciones marinas: Morelos, Orizaba, El Doctor y Xochicalco (Kix)	
MIOCENO		Js-Ki		Formaciones Tecomasuchil (marino) y Alzompa	JURASICO
		Jmt		Grupo Tecocoyunca: Lechos Rojos (continent)	
PALEOZOICO		Mmet		Formación Taxco viejo: Vulcanitas continentales epimetamórficas	PALEOZOICO
		Pa		Formación Acatlan: esquistos mesometamórficos	



Simbología

Se debe aclarar en este punto que actualmente no es posible observar las bocaminas ni la trayectoria de todos los túneles en todas las zonas, en virtud de que los habitantes han cubierto y rellenado todo indicio de falla y en algunos casos, por miedo a ser desalojados, tienen una tendencia a esconder las evidencias.

3.1.2) Estudios de Prospección Geofísica

Con la finalidad de identificar algunas zonas anómalas asociadas con posibles cavidades, se utilizan equipos de Geofísica superficial de alta tecnología (Georadar) que permiten investigar de forma rápida el terreno en los sentidos horizontal y vertical. Este equipo permite recabar información a una profundidad teórica de 35 m y así determinar si se presentan anomalías asociadas a la presencia de cavidades.

Se cuenta con información de prospección geofísica del tipo de resistividad eléctrica de algunas de las zonas minadas del Municipio, sin embargo, por el tiempo que ha

transcurrido desde la ejecución de los tendidos, éstos no son del todo confiables a la fecha, en virtud de que las condiciones prevalecientes en las cavidades pudieron haber cambiado significativamente en cuanto a la geometría horizontal y vertical. Por lo anterior, es necesario, como primer paso, la ejecución de nuevos tendidos de Geofísica superficial con radar para evaluar la condición que guardan las cavidades. Estos estudios deben realizarse en dos etapas: exploración masiva y exploración puntual de detalle.

La exploración masiva se realizará en todos los predios del Municipio, con la finalidad de observar posibles anomalías, el objetivo es lograr una alta densidad de estudio en todo el Municipio, de tal forma que se pueda configurar la posible trayectoria de las cavidades, además de elaborar los expedientes de cada lote, el número de metros cuadrados y el nombre del propietario. Por otra parte, la exploración de detalle tiene como objetivo aumentar la densidad de estudio en las zonas que han sido consideradas como anómalas en la exploración masiva, de tal forma que se puedan establecer los puntos donde sea necesario realizar perforaciones.

3.2) Procedimiento de Reducción de Riesgos

Con el objetivo de reducir las jornadas de trabajo se automatizó al máximo el procedimiento, incorporando al mismo equipos que se utilizan en el relleno como: banda transportadora con chute de carga, criba vibratoria y bomba de cavidad progresiva de mayor capacidad. Con lo anterior el procedimiento se modificó quedando las siguientes etapas:

Primera Etapa: en esta se debe estimar la ubicación y trayectoria de las cavidades, para lo cual es necesario ejecutar levantamiento subterráneo directo en las cavidades que tengan acceso y exploraciones de Geofísica masiva y de detalle con Georadar.

Segunda Etapa: en esta se ejecutan perforaciones con equipo de tipo rotativo, de tal forma que se puedan abrir pozos donde pueda entrar personal de la Unidad de Apoyo Tecnológico para realizar la inspección directa de la cavidad.

Tercera Etapa: en esta se verifica si la dimensión de la cavidad requiere la instalación de tubería de polietileno de alta densidad para ser rellena, en caso de ser necesario se instala, con un equipo de termo fusión, de lo contrario se rellena directamente. En las cavidades que cuentan con acceso directo (bocamina) se realiza la limpieza de las minas y se perfila el portal de acceso con el auxilio de una mini – retroexcavadora, para proceder a instalar la tubería.

Cuarta Etapa: con el auxilio de Servicios Públicos se instala el equipo de relleno (Alumbrado Público debe colocar una acometida trifásica para conectar los equipos eléctricos) consistente en una tina de mezclado, un equipo de filtración de arena, una banda transportadora, mismos que se conectan con la bomba de cavidad progresiva, que a su vez es conectada a la tubería de polietileno para transportar el material adentro de la mina en el caso del primer procedimiento, sin embargo actualmente se está realizando un procedimiento alterno, que consiste en bombear el hidróxido de calcio contenido en pipas mediante una bomba de concreto, el cual se va mezclando con arena al tiempo que se va vaciando en el interior de la mina.

Quinta Etapa: se inyecta a la presión necesaria una lechada de cemento de tipo puzolánico, compuesta por arena (con tamaño de partícula máximo de 1 cm.), hidróxido de calcio y agua, material que se caracteriza por su resistencia a las condiciones adversas del subsuelo.

Sexta Etapa: con el equipo de geofísica se verifica que las obras hayan resultado eficaces.

Con lo anterior las jornadas de la comunidad son menores, siendo estas básicamente: trabajo de limpieza y relleno de costales, mismos que sirven como auxiliar y para obturar túneles dentro de la mina.

Considerando que no es necesario trabajar todo el tiempo bajo la superficie, es posible mantener el mismo ritmo en épocas de lluvias con lo que se pueden generar programas de obra continuos.

Una desventaja del método es que para que sea económicamente viable se requiere contar con equipo propio de perforación, preparación de materiales e inyección de los mismos. Este equipo se podrá usar para aplicar el mismo procedimiento simultáneamente en cualquiera de las 32 zonas minadas detectadas hasta el momento.

Como se dijo en Quinta Etapa, el relleno consiste en concreto de tipo puzolánico compuesto por hidróxido de calcio, puzolanas tipo N y mineral de perlita. El mezclado para concretos espesos se hace en una autohormigonera. Para lechadas fluidas se emplea una tina de lámina galvanizada de grandes dimensiones.

En la antigüedad, los romanos emplearon el “Nuevo” mortero de cal, el cual incorporaron a sus obras de acuerdo al relato de Vitruvio (25 a.C). El compuesto de las tres sustancias (aglomerante hidráulico, arena y agua) es lo que hoy llamamos concreto. El aglomerante hidráulico o cemento puzolánico se elaboraba mezclando dos partes de “arena” volcánica (muy fina de color café), con una parte de cal (material conocido por las más antiguas civilizaciones). Los óxidos de sílice finamente pulverizados, contenidos naturalmente en la puzolana, reaccionaban químicamente con el hidróxido de calcio (la cal) en presencia del agua, para formar los componentes básicos de un aglomerante hidráulico.

Finalmente la búsqueda termina en los procesos constructivos más antiguos de donde se rescata la idea de emplear materiales de nuestro entorno. En su relato, Vitruvio habla de arena volcánica muy fina de color café, como mencionamos anteriormente la geomorfología reciente del Municipio es el resultado de numerosos eventos eruptivos, los cuales depositaron arenas compuestas de pómez, cenizas volcánicas y tobas volcánicas, todas ellas finas y de color café. Irónicamente la solución se encontró en los mismos materiales que generaron el problema, al ser extraídos durante las casi tres décadas de explotación minera.

La cal hidratada y cal normal, tienen aplicaciones en muchos procesos. En muchas ocasiones el hidróxido de calcio puede ser empleado como sustituto de la cal hidratada. En la construcción se utiliza en estabilización de caminos, tabiques de cal y arena, tabiques refractarios, mortero de cal, cemento de cal y concreto a prueba de agua. El mortero se hace mezclando una masa de cal con arena y agua, la masa de cal es hecha de cal hidratada. La calidad del mortero depende tanto del método de preparación como de las características de la cal, una cal de calcio produce mayor volumen de mortero por peso de los materiales.

Alternativas para disponer de materiales

Por otro lado, la Dirección de Protección Civil, Ecología y Bomberos recibe las solicitudes para depositar residuos sólidos no peligrosos en el Relleno Sanitario del Municipio. Uno de los principios para poder encaminar los pasos de un Municipio Ecológico es reconocer que no todo lo que parece basura lo es. A la Dirección de Protección Civil, Ecología y Bomberos llegó una solicitud para disponer una mezcla de hidróxido de calcio (cal) con agua, producto de la fabricación de acetileno, misma que, por razones obvias, despertó la curiosidad en los ingenieros, quienes se dieron a la tarea de evaluar las pruebas CRETÍ (Corrosivo, Reactivo, Explosivo, Tóxico, Inflamable) del producto, obteniendo como resultado que los materiales cumplieran con las características de resistencia necesarias para ser utilizados en el relleno de las zonas minadas.

Además se recibió una solicitud de otra empresa dedicada a la elaboración de mineral de perlita, la cual se forma por el enfriamiento rápido de una lava, es decir, cuando la temperatura desciende notablemente, el régimen de difusión en la masa fundida disminuye rápidamente y la velocidad de cristalización es prácticamente nula. Este producto sirve para la fabricación de concretos aligerados y de filtros, es un residuo sólido no peligroso que sustituye a la arena en los concretos ligeros. Las partículas que no cumplen con la granulometría especificada para el concreto estructural son desechadas en el proceso de fabricación y constituyen el residuo. En éste material se vio la oportunidad de reducir el costo del concreto al sustituir el agregado fino con él.

La perlita sin expandir, es una roca vítrea de origen volcánico que se extrae de una mina a cielo abierto. El proceso de fabricación consiste en trituración primaria y secundaria, secado y clasificación por cribas, obteniéndose 8 grados diferentes. La perlita presenta el siguiente análisis químico:

Sílice	SiO ₂	75.30%
Alúmina	Al ₂ O ₃	13.92%
Fierro	Fe ₂ O ₃	0.51%
Sodio	Na ₂ O	4.98%
Potasio	K ₂ O	4.58%
Calcio	CaO	0.62%
Otros óxidos		0.09%

Se realizaron muestras de prueba entre las puzolanas naturales del Municipio, la suspensión de cal con agua y el mineral de perlita expandido, se evaluaron las probetas, a compresión simple, hechas con distintas proporciones y finalmente se encontraron las cantidades adecuadas para todos los casos representados en las minas del Municipio.

El cemento diseñado por la Dirección de Protección Civil, Ecología y Bomberos se fundamenta en la combinación de hidróxido de calcio con materiales puzolánicos. Los cuales, al ser combinados, dan como resultado una reducción química que produce silicatos de calcio (cemento). Este aglomerado hidráulico confina y da soporte a los granos de mineral de perlita, (figura 3.8)

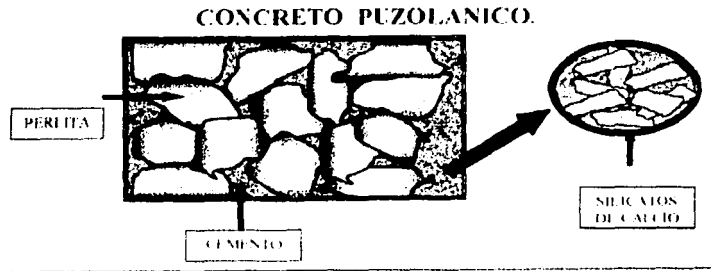


Figura 3.8 Composición del concreto puzolánico.

La perlita y la puzolana se mezclan en seco fuera de la obra, se eliminan las partículas más grandes mediante una criba vibratoria equipada con una banda transportadora y se almacenan para su posterior transportación a la zona minada. Para el abastecimiento de estos materiales se emplea una retroexcavadora que sirve para cargar los dos camiones de volteo con los que cuenta el programa.

La empresa que suministra el hidróxido de calcio no puede aumentar su producción. Por tanto, para aumentar el volumen de inyección se emplean dos tipo de mezclas de concreto puzolánico, a saber: mezcla espesa y fluida. Para esto simplemente se varían las proporciones de puzolanas y mineral de perlita.

Las mezclas espesas se vuelven plásticas y su acomodo dentro de la cavidad se concentra en los puntos cercanos al barreno, por lo que es necesario aumentar el número de perforaciones. La mezcla fresca se coloca dentro de la mina con una bomba de concreto de capacidad de hasta 30 metros cúbicos por hora. Si se emplean mezclas de alta fluidez, se debe emplear una bomba de cavidad progresiva de cuatro pasos y cuatro pulgadas de diámetro en su salida.

La bomba de cavidad progresiva sirve para inyectar lechadas fluidas que son muy útiles en las últimas fases de llenado, sin embargo, por consumir mucha lechada de agua con cal, se prefiere la colocación de mezclas espesas.

3.3) Obras Preliminares

3.3.1) Determinación de la Trayectoria de la mina (Primera Etapa)

La determinación de la trayectoria de la cavidad se realiza en los tramos que tengan acceso, por medio de la cinta y brújula; para después proceder a proyectar la mina en la superficie con el auxilio de una brigada topográfica de Desarrollo Urbano. En las siguientes fotografías se muestra el procedimiento mencionado (Fotografías 3.7, 3.8, 3.9 y 3.10).

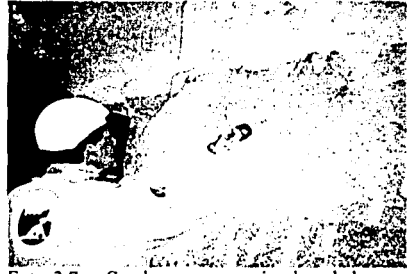


Foto 3.7 Se observa a un miembro de la brigada topográfica analizando las condiciones de las paredes de una mina.



Foto 3.8 Brigada topográfica realizando trabajos de medición.



Foto 3.9 En ocasiones las minas pueden ser utilizadas para depositar basura y cascajo, por lo que es necesario limpiarlas antes de comenzar el tratamiento.

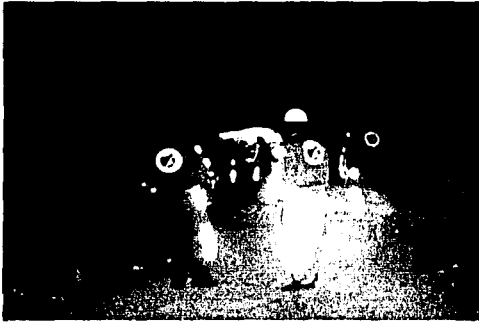


Foto 3.10 Brigada topográfica realizando trabajos de reconocimiento.

Cuando existe alguna bocamina, el acceso a la mina puede ser por la misma (Fotografías 3.11, 3.12 y 3.13), pero si la bocamina fue rellenada, o simplemente no hay indicios de su existencia se tienen que construir lumbreras a través de las cuales, el personal calificado puede acceder a la mina.



Foto 3.11 Bocamina por la cual la brigada topográfica tubo acceso a la mina.



Foto 3.12 Bocamina de entrada muy reducida.



Foto 3.13 Bocamina sellada perteneciente a una mina ya tratada.

En caso de no contar con acceso directo se ejecutan sondeos de prospección geofísica (masivos y de detalle) con radar, este procedimiento es apoyado por levantamientos superficiales de signos de colapso y asentamientos así como por la información existente de sondeos geofísicos de resistividad eléctrica (Fotografías 3.14, 3.15, 3.16, 3.17 y 31.8).



Foto 3.14 Brigada topográfica realizando trabajos de exploración con el georadar.



Foto 3.15 Brigada topográfica realizando sondeos de prospección geofísica con radar.



Foto 3.16 Brigada topográfica ajustando la antena del radar.

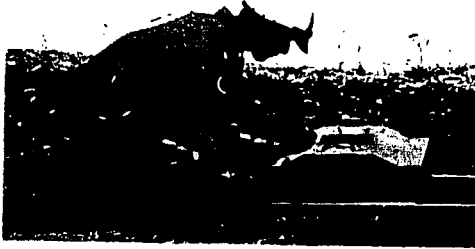


Foto 3.17 Integrante de la brigada topográfica realizando lecturas con el radar.



Foto 3.18 Equipo de exploración utilizado (radar).

Para la realización de esta etapa se requiere de lo siguiente:

- Equipo de radar de prospección geofísica de superficie con Hardware, Software, antena de 100 MHz y todos los aditamentos necesarios.
- Personal capacitado en el uso de cinta y brújula, así como los procedimientos de seguridad para laborar dentro de una mina (Brigada de topografía de Desarrollo Urbano y Personal del Escuadrón de minas).
- Equipo de iluminación personal y general (lámparas frontales y de mano).
- Material de levantamiento topográfico (cinta, brújula, pintura, brocas y solventes necesarios para proyectar la cavidad en la superficie).

3.4) Obra Principal

3.4.1) Perforación y Exploración de la mina (Segunda Etapa)

Este tipo de trabajos se deben realizar con equipo de perforación de tipo rotativo con el que se ejecutan barrenos en los puntos determinados con la exploración geofísica para confirmar anomalías. A continuación se muestra el equipo de perforación (Fotografía 3.19).



Foto 3.19 Equipo de perforación de tipo rotativo.

En el caso de ser confirmada la existencia de una cavidad, se realizan perforaciones contiguas para abrir una lumbrera, misma que es explorada por el personal del escuadrón de minas que baja con equipo para penetración de espacios confinados: tripié, poleas, arneses, cascos de espeleología y cuerdas de rescate (Fotografía 3.20).

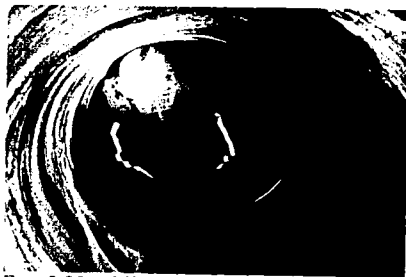


Foto 3.20 Miembro de la brigada topográfica accedendo a una mina mediante una lumbrera.

A continuación se muestran unas lumbreras realizadas para la exploración y relleno de una mina, (Fotografías 3.21 y 3.22).



Foto 3.21

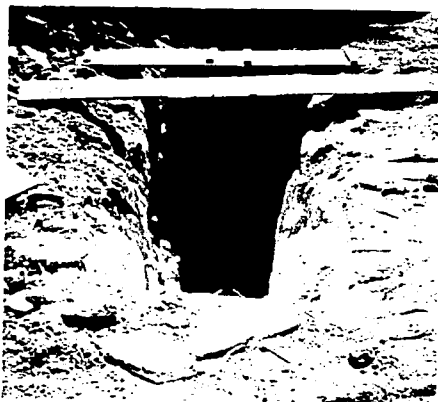


Foto 3.22 Lumbreras excavadas con la mini – retroexcavadora.

Una vez explorada la cavidad y garantizada la seguridad de la misma, se procede a realizar el levantamiento topográfico indicado en la primera etapa.

Para la realización de esta etapa se requiere lo siguiente:

- Equipo de perforación de tipo rotativo (Fotografía 3.23).
- Suministro continuo de agua.
- Acometida eléctrica.
- Equipo de penetración a espacios confinados.



Foto 3.23 Equipo de perforación de tipo rotativo.

Cuando el material perforado tiene una dureza media se utiliza una broca tricónica para la perforación (Fotografía 3.24), pero cuando el material es más duro se utiliza un martillo neumático (Fotografía 3.25).



Foto 3.24 Broca tricónica utilizada para la perforación.



Foto 3.25 Martillo neumático.

3.4.2) Preparación de la Mina (Tercera Etapa).

En caso de que la mina tenga un volumen menor de 100 m^3 y una longitud menor de 10 m se realiza el llenado sin instalación de tubería de polietileno en su interior, de lo contrario se instala tubería de polietileno de alta densidad a lo largo de toda la mina, realizando obturaciones previas a cada 12 m dejando un paso para personas, de tal forma que puedan aislarse tramos que son llenados con el material. La punta de la tubería en el último tramo debe ser elevada hasta la altura del techo de la mina, de tal forma que el vaciado del material se genere desde el punto más alto de la misma.

En las cavidades que cuentan con acceso directo (bocaminas) se realiza la limpieza de las mismas y se perfila el portal de acceso con auxilio de una mini – retroexcavadora antes de proceder a instalar la tubería (Fotografía 3.26)



Foto 3.26 Mini – retroexcavadora perfilando el portal de acceso.

Para la realización de esta etapa se requiere lo siguiente:

- Tubería de polietileno de alta densidad en cantidad suficiente para toda la longitud de la mina tratada (Fotografía 3.27).
- Equipo de termofusión, con carro alineador, y plancha recubierta con teflón (Fotografía 3.28).
- Tripiés de barrote de madera de 5 x 5 cm.
- Costales llenos de tepetate para obturar tramos.
- 3 palas, 3 picos y 3 barretas de 1.5 m.



Foto 3.27 Tubería de polietileno de alta densidad, unida mediante el equipo de termofusión.

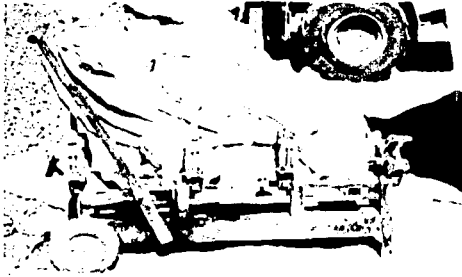


Foto 3.28 Equipo de termofusión utilizado para soldar o unir la tubería de polietileno de alta densidad.

3.4.3) Instalación del Equipo de Inyección (Cuarta Etapa)

Se debe instalar una acometida trifásica en el lugar seleccionado para colocar el equipo de cribado e inyección, mismo que sirve para suministrar energía eléctrica a los siguientes equipos: bomba de cavidad progresiva o bomba de concreto, banda transportadora y criba vibratoria.

La instalación del equipo inicia armando la tina de mezclado, que debe estar apoyada sobre suelo firme y plano, a continuación se instala la criba vibratoria sobre la tina de mezclado para armar finalmente la banda transportadora que debe contar con una tolva de carga bajo el nivel de piso, para lo cual es necesario realizar una excavación con la mini – retroexcavadora de aproximadamente 1.5 m de profundidad.

Es importante contar con áreas asignadas para almacenar arena, misma que es transportada por camiones de la Coordinación de Obras y Servicios Públicos, así mismo se debe contemplar espacio para la llegada y descarga de pipas trailer de las empresas que surten el hidróxido de calcio (Fotografía 3.29).

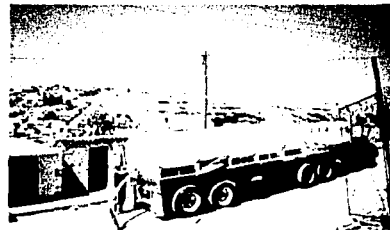


Foto 3.29 Pipa que transporta el hidróxido de calcio hasta el lugar del relleno.

Finalmente se conecta la bomba de cavidad progresiva a la tubería de polietileno de alta densidad.

Actualmente no se está utilizando la tina mezclado, ya que el hidróxido de calcio contenido en las pipas es bombeado mediante una bomba de concreto hasta la bocamina donde se mezcla con la arena, la cual es acomodada con anterioridad mediante una mini – retroexcavadora, al momento del vaciado.

Para la realización de esta etapa se requiere lo siguiente:

- Acometida trifásica.
- 100 metros de cable trifásico de uso rudo.
- Tina de mezclado de 3 x 6 x 1.5 metros, de acero, atomillable.
- Criba vibratoria de una cama con flecha excéntrica y motor eléctrico.
- Banda transportadora artezada con chute de carga.
- Bomba de cavidad progresiva de 3 pasos y 15 HP.
- 100 costales llenos de tepetate por día (hasta concluir la Etapa).

3.4.4) Inyección de Cemento Puzolánico (Quinta Etapa).

El material se coloca a través de la bomba de cavidad progresiva o mediante la bomba de concreto hasta su ubicación definitiva. Se llena desde el fondo hasta la salida, para lo cual se divide la mina en tramos de aproximadamente 100 m³ (cámaras de llenado) que son obturados con costales.

Se debe realizar la mezcla de concreto colocando en primer lugar el hidróxido de calcio hidratado en la tina de mezclado, agregando después la arena y cualquier aditivo rico en alúmina y sílice (silicoaluminato de sodio) que es elevada por la banda transportadora y filtrada por la criba vibratoria, cayendo finalmente a la tina de mezclado. Este proceso se realiza para garantizar que todas las partículas sean recubiertas con una película de hidróxido de calcio antes de iniciar la inyección, cuidando de no exceder la presión confinante. Sin embargo, como ya se mencionó

anteriormente, actualmente no se está utilizando la tina de mezclado, ya que la mezcla se hace directamente al momento de vaciar el material en la bocamina.

Se vacía el material hasta que se eleve la presión sin exceder la confinante y cuidando que el volumen no exceda al calculado para el tramo. Una vez vaciado el volumen se detiene la inyección para preparar la siguiente cámara.

La preparación de la siguiente cámara se realiza cortando la tubería a la mitad de la longitud de la misma, recuperando el tramo restante y retirando los tripiés de madera sobrantes. Una vez lista la tubería, que debe colocarse a la altura del techo y en el punto más alto del tramo, se procede a cerrar la puerta de acceso a la cámara con costales que son colocados desde la tercer etapa (Preparación de la Mina), para proceder a llenar la cámara. Este proceso se repite hasta concluir todos los tramos, para lo cual se lleva un estricto control de los niveles de oxígeno en las cámaras.

Para la realización de esta Etapa se requiere lo siguiente:

- Arena de composición andesítica, tobas volcánicas, arenas pumíticas con un porcentaje de partículas mayores de 1 cm menor al 5%. Aproximadamente 100 m³ por día.
- Hidróxido de calcio (cal de carburo) hidratado, aproximadamente 100 m³ por día.
- Agua limpia, aproximadamente 2 m³ por día.
- Mini – retroexcavadora.
- Equipo de medición de niveles de oxígeno.
- Herramienta de mano (serrotes, palos, picos, etc.).
- Silicoaluminato de sodio, 18 m³ por semana.
- Pruebas de compresión simple. Una muestra de tres cilindros a cada 500 m de inyección.

A continuación se muestra la bomba de concreto utilizada para bombear el hidróxido de calcio hasta la bocamina (Fotografía 3.30), la mini – retroexcavadora que se utiliza para colocar la arena que se mezcla con el hidróxido de calcio (Fotografía 3.31) y la retroexcavadora utilizada cuando el volumen de material es mayor (Fotografía 3.32).



Foto 3.30 Bomba de concreto, la manguera de color verde es la que transporta el hidróxido de calcio hasta la bocamina y la gris es la que transporta el hidróxido de calcio proveniente de la pipa.



Foto 3.31 Escuadrón de minas acomodando el material que se utilizará en el relleno de las minas.



Foto 3.32 Retroexcavadora utilizada cuando el volumen de material es mayor.

En las siguientes fotografías se muestra el procedimiento de relleno de minas (Fotografías 3.33, 3.34 y 3.35).



Foto 3.33



Foto 3.34

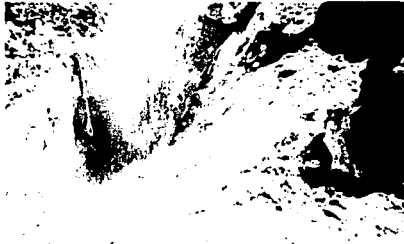


Foto 3.35 Escuadrón de minas realizando trabajos de relleno de una cavidad.

A continuación se muestra una mina, la cual ya fue rellenada en su totalidad (Fotografías 3.36).



Foto 3.36 Bocamina de una cavidad tratada en su totalidad.

3.5) Trabajos Complementarios

3.5.1) Geofísica de Confirmación (Sexta Etapa)

Se deben realizar líneas de Geofísica con Georadar para verificar que la cavidad ha sido tratada adecuadamente y que el relleno presenta la suficiente homogeneidad y continuidad.

En las zonas que se tengan duda y con el fin de verificar el estado final del relleno es necesario ejecutar sondeos para obtener muestras de tipo inalterado con tubo shelby, este procedimiento se realiza 3 meses después de finalizar los trabajos de reducción de riesgos. Con las muestras se deben realizar pruebas triaxiales de tipo UU, para obtener los parámetros de resistencia del relleno.

Una vez que el material ha alcanzado su resistencia, tres meses después de finalizar los trabajos de reducción de riesgos, se forman grietas de tensión en toda la superficie del relleno (Fotografías 3.37 y 3.38).



Foto 3.37 Grietas de tensión que se forman por la contracción que sufre el relleno.

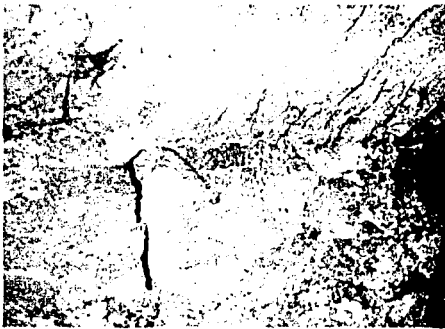


Foto 3.38 Agrietamiento producido por la contracción del material.

Para la realización de esta etapa se requiere lo siguiente:

- Equipo de Geofísica GPR Sir System 2 con antena de 100 MHz.
- 1 sondeo mixto con muestreo inalterado del relleno (sólo si es necesario).
- 1 prueba triaxial tipo UU (sólo si es necesario).

Para ejecutar las acciones del Programa fue necesario reclutar y capacitar personal en técnicas poco convencionales de trabajo, se establecieron protocolos de seguridad para acceder a las minas, los cuales incluyen técnicas de evaluación estructural de túneles, trabajo vertical, rescate con cuerdas, rescate en espacios confinados y en áreas colapsadas.

La capacitación se realizó, entre otros lugares, en el Centro Nacional de Capacitación y Adiestramiento de la Cruz Roja, en el Campo de Escombros de la Unidad Canófila de la Universidad Nacional Autónoma de México, en la Escuela Militar de Oficiales de Sanidad y en el Campo de Prácticas del Centro de Capacitación y Adiestramiento Atizapán Amigo.

Actualmente el personal opera retroexcavadoras, vehículos pesados, bombas de cavidad progresiva, bombas de concreto, equipos de perforación, equipos de aire autónomo y equipos de geofísica con un alto rendimiento. Domina las técnicas de ademado, así como de apuntalamiento de perforaciones y estructuras colapsadas. Ha practicado con las mejores brigadas del país en rescate en cavernas, rescate de pacientes sepultados y rescate con cuerdas, además cuenta con el más moderno equipo de protección para espacio confinado y ha ejecutado rescates con eficacia.

Con esto se ha logrado combinar adecuadamente eficiencia y seguridad, esto se demuestra al observar que no se han presentado accidentes durante los trabajos del Programa. Además de las acciones meramente preventivas representadas por el relleno de las cavidades, se ha integrado un equipo altamente adiestrado para atender a la población ante cualquier siniestro por colapso de alguna mina.

3.6) Apoyos Adicionales

3.6.1) Reparación de fugas en Sistema de Agua Potable, Drenaje, Cisternas, Fosas Sépticas, etc.

SAPASA (Sistema de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento) debe llevar a cabo un programa de verificación y reparación de fugas de agua en toda la zona de trabajo, para lo cual se apoya con el equipo de Geofísica de superficie radar. Debe llevar verificaciones periódicas durante todo el tiempo que duren los trabajos.

Para la realización de estos trabajos se requiere lo siguiente:

- Equipo de Geofísica de superficie radar.
- Los que SAPASA considere necesarios.

3.6.2) Colocación de Elementos de Restricción al Tránsito de todo tipo de vehículos en la zona afectada.

Se debe prohibir todo tipo de vehículos durante las horas que se trabaje dentro de la cavidad para lo cual se deben colocar cadenas, plumas o cualquier otro tipo de elemento que obstruya el paso de vehículos.

Se debe prohibir el paso de vehículos del sistema de transporte de pasajeros, de carga o cualquier otro tipo de vehículo pesado, todo el tiempo hasta que se terminen los trabajos de reducción de riesgos.

Para la realización de estos trabajos se requiere lo siguiente:

- Apoyo por parte de Tránsito Municipal, para supervisar que se cumplan las restricciones de tránsito.
- Elementos adecuados para restringir el paso de vehículos.

CAPÍTULO 4

REQUERIMIENTOS PRESUPUESTALES Y APLICACIONES

Finalmente después de haber expuesto el procedimiento utilizado por el Municipio de Atizapán de Zaragoza para la reducción de riesgos en zonas minadas es importante presentar el costo requerido para la realización de dicho procedimiento, para lo cual se muestra una comparativa entre el costo unitario comercial del metro cúbico de mina tratada sin subsidios y el costo unitario del metro cubico de mina tratada con subsidio y utilizando hidróxido de calcio.

4.1) Costo Unitario Comercial del metro cúbico de mina tratada sin subsidios

La Dirección de Protección Civil, Ecología y Bomberos del Municipio de Atizapán de Zaragoza, se dio a la tarea de investigar el costo unitario comercial del metro cúbico de mina tratada, con el fin de obtener una comparativa para el método empleado en dicho Municipio, y así tener fundamentos para afirmar que el Programa de Reducción de Riesgos adoptado sería el óptimo. De dicha investigación se desprenden los siguientes costos de materiales, mano de obra y equipo.

Tabla 6. MATERIALES

Concepto	Unidad	Cantidad	P.U. (\$)	Importe (\$)
Cal	Kg	100	0.84	84.00
Agua	Lt.	300	0.0125	3.75
Arena por camión	m ³	0.75	80.00	60.00
Tubería PAD	ml.	0.082	60.00	4.92
Madera	Pza.	0.062	115.00	7.13
Clavos	Kg	0.062	15.00	0.93
Alambre	Kg	0.062	14.70	0.91
SUBTOTAL				161.64

Tabla 7. MANO DE OBRA

Concepto	Unidad	Cantidad	P.U. (\$)	Importe (\$)
Ing. Geotecnista	Hr.	0.1	65.00	6.50
Jefe Dpto. Minas	Hr.	0.1	32.20	3.22
Técnico en Geotecnia	Hr.	0.8	19.55	15.64
SUBTOTAL				25.36

Tabla 8. EQUIPO

Concepto	Unidad	Cantidad	Costo Horario (\$)	Importe (\$)
Georadar	Hr.	0.096	367.00	35.23
Criba Vibratoria	Hr.	0.086	195.00	16.77
Tina de Mezclado	Hr.	0.068	75.40	5.13
Bomba de Cavidad Progresiva	Hr.	0.093	175.70	16.34
Banda Transportadora	Hr.	0.083	193.80	16.09
Mini - retroexcavadora	Hr.	0.024	213.60	5.13
Equipo de Perforación	Hr.	0.022	250.90	5.52
SUBTOTAL				100.20

**Tabla 9. COSTO UNITARIO COMERCIAL DEL METRO CUBICO DE MINA
TRATADA**

MATERIALES	\$ 161.64
MANO DE OBRA	\$ 25.36
EQUIPO	\$ 100.20
TOTAL	\$ 287.20

Como ya se mencionó anteriormente, el Municipio ha propuesto un Programa de Reducción de Riesgos basándose en el uso de materiales de desecho como lo es el hidróxido de calcio y el mineral de perlita expandido, con lo cual se ha logrado abatir el costo unitario de metro cúbico de mina tratada, y de esta manera se pueden atender muchos casos más con el mismo costo.

4.2) Costo Unitario del metro cúbico de mina tratada con subsidio y empleando hidróxido de calcio.

La propuesta económica para el proyecto consiste en que la comunidad participe con materiales y con mano de obra, que el H. Ayuntamiento subsidie el costo de algunos materiales a través del uso de maquinaria de acarreo propia, así como con la donación de arena andesítica producto de los trabajos de habilitación de celdas en el relleno sanitario y utilizando materias primas alternas (cal de carburo).

La participación del H. Ayuntamiento consiste en la adquisición del equipo de exploración, perforación, preparación de materiales e inyección, con su operación y con la asesoría técnica a las comunidades afectadas por cavidades, con lo que la componente del Precio Unitario denominada "equipo", será financiada por el H. Ayuntamiento.

El proyecto general consiste en rellenar 113,270.00 m³ de cavidades, volumen equivalente al de todas las zonas críticas minadas del Municipio descubiertas hasta el momento. El equipo propuesto es de la más alta tecnología por lo que permite explorar minas, preparar materiales e inyectar 150 m³ de lechada diariamente, siempre y cuando el suministro de los materiales sea continuo, con lo cual se abate tiempo y costo.

Algunos de los materiales propuestos son, arena en greña adquirida directamente en el punto de explotación, misma que deberá transportarse con camiones de la Coordinación de Obras y Servicios Públicos, con los que se pueden abatir costos de 80.00 pesos por metro cúbico a 40.00 pesos; y si además se toma en cuenta la donación de mineral de perlita utilizado como agregado, el costo se puede abatir aún más.

Por su parte la lechada de cementante compuesta por agua y cal, con un costo de \$ 87.75 pesos por metro cúbico puede sustituirse por hidróxido de calcio hidratado (cal de carburo) con un costo de \$ 21.30 por metro cúbico de mina tratada.

Tabla 10. MATERIALES

Concepto	Unidad	Cantidad	P.U. (\$)	Importe (\$)
Cementante	Lt.	300	0.071	21.30
Arena en greña	m ³	0.75	40.00	30.00
Tubería PAD	ml.	0.082	60.00	4.92
Madera	Pza.	0.062	115.00	7.13
Clavos	Kg	0.062	15.00	0.93
Alambre	Kg	0.062	14.70	0.91
SUBTOTAL				65.19

Tabla 11. MANO DE OBRA

Concepto	Unidad	Cantidad	P.U. (\$)	Importe (\$)
Ing. Geotecnista	Hr.	0.1	65.00	6.50
Jefe Dpto. Minas	Hr.	0.1	32.20	3.22
Técnico en Geotecnia	Hr.	0.8	19.55	15.64
SUTOTAL				25.36

Tabla 12. EQUIPO

Concepto	Unidad	Cantidad	Costo Horario (\$)	Importe (\$)
Georadar	Hr.	0.096	367.00	35.23
Criba vibratoria	Hr.	0.086	195.00	16.77
Tina de mezclado	Hr.	0.068	75.40	5.13
Bomba de cavidad progresiva	Hr.	0.093	175.70	16.34
Banda Transportadora	Hr.	0.083	193.80	16.09
Mini – retroexcavadora	Hr.	0.024	213.60	5.13
Equipo de Perforación	Hr.	0.022	250.90	5.52
SUBTOTAL				100.20

Tabla 13. COSTO UNITARIO DEL METRO CUBICO DE MINA TRATADA,

MATERIALES	\$ 65.19
MANO DE OBRA	\$ 25.36
EQUIPO	\$ 100.20
TOTAL	\$ 190.75

4.3) Tabulador de Aportaciones de la comunidad por concepto de incorporación al Programa.

Actualmente la Dirección de Protección Civil, Ecología y Bomberos del Municipio de Atizapán de Zaragoza tiene a disposición de los colonos de dicho Municipio el Programa de Reducción de Riesgos, el cual puede operar de dos maneras, la primera es que el Escuadrón de Minas del Municipio realice un reconocimiento de campo y descubra alguna anomalía en el terreno, a partir de este momento dicha zona ingresa al Programa; la segunda consiste en que los propios colonos soliciten el servicio, por sufrir algún daño en su inmueble o en zonas aledañas.

Las aportaciones se deberán realizar tomando en cuenta las siguientes características:

1. Zona Económica
2. Tamaño del Predio
3. Características especiales del predio

Las comunidades que participen en el Programa de Reducción de Riesgos en Zonas Minadas pagarán el arancel de integración y al concluir los trabajos recibirán un certificado de reducción de riesgos por cavidad subterránea.

Por lo anterior las aportaciones deberán ser de acuerdo al siguiente tabulador:

Tabla 14. TABULADOR DE APORTACIONES DE LA COMUNIDAD POR CONCEPTO DE INCORPORACIÓN AL PROGRAMA.

REGIÓN ECONOMICA	TERRENO	ARANCEL EN SALARIOS MINIMOS DIARIOS (\$)
Zona Popular	Hasta 200 m ²	16.55
	De 201 a 500 m ²	26.49
	Mas de 500 m ²	33.11
Fraccionamientos	Hasta 200 m ²	26.49
	De 201 a 500 m ²	33.11
	Mas de 500 m ²	43.03
Zona Esmeralda	Hasta 200 m ²	33.11
	De 201 a 500 m ²	49.66
	De 501 a 1000 m ²	66.22
	Mas de 1000 m ²	99.33
Especial	Cualquier superficie	Según Características

Los precios anteriores incluyen Dictamen de No Riesgo por cavidad subterránea, al concluir el Programa.

4.4) Tabulador de aportaciones por servicio de Dictamen de No Riesgos por cavidad subterránea con o sin uso de Georadar.

En algunas ocasiones existe por parte de la ciudadanía la necesidad de obtener dictámenes de ausencia de riesgo por minas, particularmente cuando pretende realizar alguna operación de compra – venta. Por lo que es posible brindar este servicio a un precio menor al del mercado, con lo que se fortalece el marco financiero del Programa. Para obtener el dictamen, es necesario que el Escuadrón de Minas realice un reconocimiento de campo con o sin uso de Georadar, cuando la existencia de alguna cavidad subterránea es evidente no se utiliza el Georadar y se procede a perforar una lumbrera, por donde el personal capacitado puede introducirse a la mina y realizar el levantamiento topográfico correspondiente para después proceder a aplicar el tratamiento adecuado. Los servicios de dictamen de no riesgos por cavidad subterránea se deberán cobrar de acuerdo al siguiente tabulador:

Tabla 15. TABULADOR DE APORTACIONES POR SERVICIO DE DICTÁMEN DE NO RIESGOS POR CAVIDAD SUBTERRÁNEA CON O SIN USO DE GEORADAR

REGION ECONOMICA	TERRENO	ARANCEL EN SALARIOS MINIMOS DIARIOS
Zona Popular	Hasta 200 m ²	\$ 16.55
	De 201 a 500 m ²	\$ 26.49
	Mas de 500 m ²	\$ 33.11
Fraccionamientos	Hasta 200 m ²	\$ 26.49
	De 201 a 500 m ²	\$ 33.11
	Mas de 500 m ²	\$ 43.03
Zona Esmeralda	Hasta 200 m ²	\$ 33.11
	De 201 a 500 m ²	\$ 49.66
	De 501 a 1000 m ²	\$ 66.22
	Mas de 1000 m ²	\$ 99.33
Especial	Cualquier superficie	Según características

En caso de requerirse perforación para descartar anomalías, ésta correrá por cuenta del interesado sin perjuicio para el arancel.

4.5) Logros Alcanzados

Hasta el día de hoy se han inyectado 13,330.00 metros cúbicos equivalentes a 22,133 toneladas de concreto puzolánico, de un total de 113,270.00 metros cúbicos, en las colonias Calacoaya, 5 de Mayo y Alfredo V. Bonfil entre otras. Con esto se ha logrado atender a más de mil familias que habitan en zonas de alto riesgo. En la siguiente tabla se muestran algunos avances:

Tabla 16. ZONAS MINADAS DEL MUNICIPIO DE ATIZAPAN DE ZARAGOZA

RIESGO	Nº	ZONA MINADA	ESTUDIO	ESTABILIZACION	VOLUMEN M ³
A L T O	1	TIERRA DE EN MEDIO	S/ESTUDIO	PENDIENTE	6,350.00
	2	LA CANADA	C/ESTUDIO	PENDIENTE	4,100.00
	3	EXHACIENDA PEDREGAL	C/ESTUDIO	PENDIENTE	10,500.00
	4	CALACOAYA	C/ESTUDIO	70% PARCIAL	5,550.00
	5	SAN JOSE PROVI	S/ESTUDIO	PENDIENTE	4,350.00
SUBTOTAL					30,850.00
M E D I O	6	5 DE MAYO	C/ESTUDIO	90% PARCIAL	6,000.00
	7	MEXICO 86	C/ESTUDIO	PENDIENTE	3,800.00
	8	SAN JUAN IXTACALA	S/ESTUDIO	PENDIENTE	2,500.00
	9	CERRO DE LA CRUZ	S/ESTUDIO	PENDIENTE	8,500.00
	10	LOMAS DE SAN LORENZO	S/ESTUDIO	PENDIENTE	3,450.00
	11	ALFREDO V. BOFIL	C/ESTUDIO	80% PARCIAL	6,800.00
	12	AMPL. LOPEZ MATEOS	C/ESTUDIO	PENDIENTE	13,200.00
	13	EJIDO DE TAPALCAPA	S/ESTUDIO	PENDIENTE	7,000.00
	14	CASA JUVENTUD	S/ESTUDIO	PENDIENTE	5,100.00
	15	MONTE MARIA	S/ESTUDIO	PENDIENTE	8,300.00
	16	CONDADO DE SAYAVEDRA	PARTICULAR	S/INFORMACION	3,670.00
SUBTOTAL					68,320.00
B A J O	17	MORELOS	S/ESTUDIO	MONITOREO	4,700.00
	18	FRACC. BELLAVISTA	S/ESTUDIO	MONITOREO	3,000.00
	19	LAZARO CARDENAS DEL RIO	C/ESTUDIO	MONITOREO	5,700.00
	20	LAS ALAMEDAS	C/ESTUDIO	PARCIAL/MONITOREO	700.00
SUBTOTAL					14,100.00
TOTAL					113,270.00

Finalmente, el H. Ayuntamiento de Atizapán de Zaragoza ha implementado a través de la Dirección de Protección Civil, Ecología y Bomberos el Programa de Reducción en Zonas minadas con el objetivo de salvaguardar la vida, los bienes y el entorno de los ciudadanos que habitan las zonas afectadas por cavidades subterráneas de origen artificial.

El conocimiento que se ha adquirido sobre el entorno, en conjunto con el interés por resolver los problemas en el contexto de un Desarrollo Sustentable, ha servido para comprender que la solución a los problemas no necesariamente está en la grandilocuencia de las tecnologías modernas. Hoy, se reconoce que se requiere dirigir los pasos hacia proyectos concebidos a mediano plazo, que den espacio a la investigación interdisciplinaria, a la meditación y a la propuesta inteligente y serena.

CONCLUSIONES

Una de las bases para poder identificar antiguas minas y para suponer la presencia de oquedades o cavidades en el subsuelo de la zona que se pretende estudiar puede ser el hecho de conocer la estratigrafía de los suelos existentes en la zona poniente del Valle de México, así mismo este conocimiento puede servir para generar presupuestos para el estudio e investigación del subsuelo, con lo cual se pueden establecer programas de exploración apegados a la realidad.

Como se mencionó en el capítulo 1, la exploración en zonas minadas se puede apoyar en métodos directos, semidirectos e indirectos, siempre tomando en cuenta las características específicas de la zona a explorar. Sin embargo, en caso de encontrar alguna cavidad en la zona de exploración, siempre es necesaria una inspección directa, cuando sea posible, para determinar la geometría, grado de alteración y estabilidad de la mina.

Las teorías presentadas para el análisis del estado de esfuerzos y deformaciones se basan en cavidades de forma circular idealizando las condiciones, sin embargo, en la práctica las cavidades presentan diferente geometría de las galerías, y las propiedades mecánicas de los suelos y la influencia del intemperismo varían de una cavidad a otra, por lo que la aplicación de estas teorías de análisis pueden resultar complicadas, sin embargo su conocimiento facilita el entendimiento de los mecanismos de falla.

Siempre se deben tomar en cuenta las características propias de cada zona minada para elegir el método más conveniente para el tratamiento, se recomienda el uso del método de relleno e inyección de cavidades en cualquier caso, sin embargo en ocasiones no se utiliza porque puede representar un costo elevado. Sin objeción alguna, el tratamiento más costoso es el de cimentaciones profundas ya que debe realizarse en conjunto con otro tipo de tratamiento como lo es el relleno controlado.

Finalmente sólo queda mencionar que definitivamente, la toma de decisiones y la elección de alternativas dependerá de la experiencia y el criterio del Ingeniero especialista en la materia.

BIBLIOGRAFIA

Aramburu J, A. 1985. Apuntes de Mecánica de Rocas. Facultad de Ingeniería. UNAM.

Dirección de Protección Civil, Ecología y bomberos. 1999. Programa Municipal de Reducción de Riesgos en Zonas Minadas. H. Ayuntamiento de Atizapán de Zaragoza. México.

GeoPhysical Survey Systems. Estados Unidos, 1994.

Juárez Badillo, E. Rico Rodríguez, A. 2000. Mecánica de Suelos. Editorial Limusa. Tomo 2. México.

Kosmatka, S. Panarese, W. 1992. Diseño y Control de Mezclas de Concreto. Instituto Mexicano del Cemento y el Concreto, A.C. México.

Mooser, F., Montiel, A., Zúñiga, A. 1996. Nuevo Mapa Geológico de las Cuencas de México, Toluca y Puebla. Primera edición. Comisión Federal de Electricidad. México.

Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. 1996. Monografía Geológica – Minera del Estado de México. Coordinación General de Minería. OFFSET de Diseño. México.

Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos. 1976. Cimentaciones en Zonas Minadas de la Ciudad de México. México.

Stagg, Z. 1968. Mecánica de Rocas en la Ingeniería Práctica. Editorial Blumez. Madrid.

Zavala P, G. 1995. Tratamiento y Regeneración de zonas minadas al poniente de la Cd. De México. México.