

21142



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ACATLAN

"TRATAMIENTO DE ZONAS MINADAS DEL
PONIENTE DEL VALLE DE MEXICO".

TESIS

QUE PARA OBTENER EL DIPLOMA DE
ESPECIALIZACION EN GEOTECNIA

PRESENTA

LUIS EDUARDO PEREZ-ORTIZ CANCINO

DIRECTOR DE TESIS: DR. JOSÉ MARÍA CHÁVEZ AGUIRRE.



OCTUBRE 2004



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.

NOMBRE: LUIS EDUARDO

PEREZ-ORTIZ CANCINO

FECHA: 19/OCT/09

FIRMA: 

AGRADECIMIENTOS.

A Dios por darme la vida y la oportunidad de estudiar.

A Erika por estos primeros seis años de amor.

A Erikita y Mayito por darme el más hermoso motivo para seguir adelante.

A mis Papas Mario e Irma por su entrega, amor y ejemplo.

A mis Hermanos Viri, Mario y Mauricio por su compañía y amor.

Al Dr. José María por su interés en mi preparación y vocación.

A mis Profesores por compartir generosamente sus conocimientos y experiencia.

Gracias Siempre.

INDICE.

INTRODUCCIÓN.

CAPÍTULO 1.- LOS ABANICOS VOLCANICOS DE LA SIERRA DE LAS CRUCES.

1.1.- GEOLOGIA.

1.2.- ESTRATIGRAFIA DE LA FORMACIÓN TARANGO.

CAPÍTULO 2.- TOBAS: PUZOLANAS NATURALES.

2.1.- PUZOLANAS NATURALES.

2.2.- CLASIFICACION DE LAS PUZOLANAS.

2.3.- ZEOLITAS.

2.4.- ARCILLAS.

2.5.- ANÁLISIS DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X EN POLVOS, REALIZADOS A MUESTRAS DE TOBAS DEL MUNICIPIO DE ATIZAPÁN DE ZARAGOZA.

CAPITULO 3.- ACTIVIDAD PUZOLANICA.

3.1.- REACTIVIDAD PUZOLANICA DE LAS TOBAS.

3.2.- COMBINACION DIRECTA, CARBONATACIÓN Y CRISTALIZACIÓN DEL HIDROXIDO DE CALCIO.

3.3.- CAL DE CARBURO.

3.4.- ANÁLISIS DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X EN POLVOS, REALIZADOS A MEZCLAS DE TOBAS CON CAL DE CARBURO.

CAPITULO 4.- SUBSIDENCIA, COLAPSO Y ESTABILIDAD DE TERRENOS MINADOS.

- 4.1.- SUBSIDENCIA Y COLAPSO DE ZONAS MINADAS
- 4.2.- CONDICIONES HIDRÁULICAS.
- 4.3.- PRESIÓN DE TIERRAS EN MINAS.

CAPITULO 5.- PROCESO DE REDUCCIÓN DE RIESGOS EMPLEADO EN EL MUNICIPIO DE ATIZAPÁN DE ZARAGOZA.

- 5.1.- ETAPA DE DETECCIÓN Y EXPLORACIÓN DE ZONAS MINADAS.
- 5.2.- ETAPA DE HABILITACIÓN DE CAVIDADES.
- 5.3.- RELLENO DE CAVIDADES Y PROPIEDADES INHERENTES A LAS MEZCLAS TOBA-CAL DE CARBURO.

CONCLUSIONES.

BIBLIOGRAFIA.

INTRODUCCIÓN.

"Estas son hoy necesidades que urge colmar para que no se agrande la distancia entre nuestro país y los más prósperos; para que nuestros compatriotas puedan mejorar la calidad de su vida; para que investigadores e ingenieros civiles cumplamos con la misión que se nos encomienda, con la misión que ilusionados nos asignamos a nosotros mismos; la de servir significativa y eficazmente al país que amamos".

Dr. Emilio Rosenblueth Deutsh.

La zona de lomas del poniente del Valle de México es conocida por estar afectada por cavidades subterráneas de origen artificial, resultado de explotaciones mineras realizadas sin un control en el pasado. Dicho problema afecta a un gran número de predios donde se encuentran asentamientos humanos, que están en situación de riesgo.

Para reducir los efectos de dicha situación, a lo largo de los años se han empleado distintos procedimientos tales como instalación de revestimientos, concreto lanzado, colocación de costales rellenos con arena, inyección de lechadas cementantes basadas en cemento Portland principalmente, etcétera.

La presencia de las cavidades afecta a un gran número de personas que habitan al pie de la Sierra de las Cruces, en la zona de lomas, conformada por depósitos de materiales de origen volcánico.

A partir del desarrollo del Sistema de Protección Civil en los tres niveles de gobierno de nuestro país, algunas autoridades han asumido la situación como una responsabilidad gubernamental, toda vez que la existencia de minas en el subsuelo genera problemas que afectan al desarrollo social y económico

de las comunidades, sin mencionar el riesgo para las vidas, para el patrimonio y para el entorno de cientos de familias. Los principales efectos de la presencia de estas antiguas minas son los siguientes:

1.- Riesgo para la vida.

2.- Riesgo para el patrimonio.

3.- La mayoría de las zonas minadas no están escrituradas y por tanto son irregulares. Las personas que las habitan no cuentan con la certeza jurídica de su patrimonio.

4.- Al ser irregulares, los gobiernos municipales se ven limitados para realizar inversiones en la dotación de servicios, así como en la recaudación del impuesto predial.



Figura 1.- Programa Municipal de Reducción de Riesgos en Zonas Minadas en el municipio de Atizapán de Zaragoza.

Por estas razones, en 1998 el Ayuntamiento de Atizapán de Zaragoza implementó el Programa Municipal de Reducción de Riesgos en Zonas

Minadas, con la finalidad de cambiar la situación en que vive un gran número de ciudadanos del municipio.

Si se emplearan los métodos tradicionales, esta empresa representaría una inversión imposible de absorber para el presupuesto municipal. Por tal motivo, ha sido necesario desarrollar nuevos materiales y un procedimiento que emplee suelos del lugar así como un subproducto de la producción de acetileno, rico en hidróxido de calcio.

La Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos en el Simposio denominado Cimentaciones en Zonas Minadas de la Ciudad de México, en 1976 recomendaba estudiar las propiedades puzolánicas de los suelos naturales con miras a emplearlos económicamente en el relleno de cavidades. Por lo que, para implementar una solución al alcance de las posibilidades de un municipio como Atizapán, fue necesario estudiar a fondo esta alternativa.

En este documento el autor presenta algunas de las experiencias, así como los principales aspectos técnicos relacionados con la solución implementada, se describen algunos de los conocimientos que él mismo ha adquirido como Coordinador del Programa.

A lo largo de este trabajo se desarrolla la siguiente hipótesis: "Al mezclarse el hidróxido de calcio de la cal de carburo con algunas de las fases presentes en las tobas provenientes de los depósitos de la Sierra de las Cruces, precipitan silicatos de calcio hidratados, aluminatos de calcio hidratados, carbonatos de calcio, sulfatos de calcio así como cristales de hidróxido de calcio, que generan las propiedades necesarias para ser empleados en la reducción de riesgos por subsidencia y colapso en las zonas minadas del poniente del Valle de México".

El primer capítulo es dedicado a la descripción de los depósitos de la Formación Tarango, haciendo énfasis en los materiales que fueron objeto de

explotación minera en el pasado y en aquellos que por sus características podrían ser empleados económicamente en la producción de mezclas.

En el segundo capítulo se tratan algunos aspectos relacionados con las puzolanas naturales y su clasificación. Se profundiza en dos de las fases minerales de las tobas, las cuales pueden afectar el comportamiento y la reacción al ser mezcladas con cal de carburo, estas son las zeolitas y las arcillas. Finalmente, se presentan los resultados del análisis de difracción de rayos X de polvos, realizados a dos muestras de tobas provenientes del municipio de Atizapán de Zaragoza.



Figura 2.- Trabajos de habilitación de cavidades en el municipio de Atizapán de Zaragoza.

La reactividad puzolánica de las tobas es tratada en el tercer capítulo, se analizan las dos teorías principales: la del Intercambio Catiónico y la de Combinación Directa. En este mismo capítulo se describen las principales propiedades de la cal de carburo. Al final del mismo se presentan los resultados de los análisis de difracción de rayos X de polvos realizados a tres muestras de suspensiones hechas a partir de cal de carburo y tobas

provenientes del municipio de Atizapán de Zaragoza, con las que se pretende confirmar la presencia de silicatos de calcio hidratados, aluminatos de calcio, carbonatos de calcio, sulfatos de calcio e hidróxido de calcio cristalino.

El cuarto capítulo trata sobre los problemas de subsidencia y colapso relacionados con la presencia de antiguas explotaciones mineras en el subsuelo, es analizado el posible mecanismo de falla de las mismas, se brinda especial atención a los cambios que la mina induce en las condiciones hidráulicas de la masa de suelo. Es aplicado el criterio de Terzaghi para estimar la presión de tierras, empleando las propiedades índice y mecánicas de algunos sitios minados ubicados en Atizapán de Zaragoza.

En el quinto capítulo se describe el proceso de reducción de riesgos empleado, trata sobre la técnica usada para detectar y explorar zonas minadas. Particular atención se brinda a las ventajas y limitaciones en el uso de equipos de geofísica de tipo electromagnéticos como el Radar de Gran Penetración para la detección de minas. También son mencionadas las diferentes formas en que han sido habilitadas las minas antes de su relleno, mencionando los principales problemas inherentes a las suspensiones empleadas así como sus rangos de aplicación.

CAPITULO 1.- LOS ABANICOS VOLCÁNICOS DE LA SIERRA DE LAS CRUCES.

1.1.- GEOLOGÍA.

Los abanicos volcánicos de la Sierra de las Cruces están compuestos por la acumulación de materiales piroclásticos que se depositaron a los pies de los distintos aparatos volcánicos durante la vida explosiva de éstos, entre 5 y 10 millones de años antes del presente. Las lomas se formaron principalmente en el Plioceno Inferior.

La Formación Tarango representa un conjunto estratificado a veces regular, a veces irregular y hasta lenticular, ligeramente inclinado a cuatro grados, compuesto de los seis elementos litológicos siguientes.

- ◆ Tobas resultado de horizontes de cenizas volcánicas de muy distintas granulometrías.
- ◆ Capas de erupciones pumíticas.
- ◆ Lahares.
- ◆ Ignimbritas.
- ◆ Depósitos fluviales.
- ◆ Suelo vegetal.

Todos estos elementos, son producto de erupciones por lo general violentas, emitidas por las chimeneas de grandes volcanes andesíticos estratificados. Las condiciones climatológicas pudieron haber generado

distintos grados de alteración por intemperismo en estos depósitos, los cuales analizaremos más adelante, en virtud de que dichos procesos favorecen la actividad puzolánica de estos materiales.

Según la actividad del aparato volcánico individual y según el magma contenido en él, las erupciones producen cenizas, pómez, brechas, avalanchas ardientes o lavas. Las cenizas producidas por explosiones violentas se dispersan a mayores distancias del cráter. Las erupciones más violentas producen piedra pómez que se deposita en capas de gran uniformidad hasta distancias muy lejanas del cráter.

Los lahares son acumulaciones caóticas de material piroclástico arrastrado en corrientes lubricadas por agua. Al formarse importantes depósitos de material fragmentado al pie de un cono volcánico puede suceder que una lluvia torrencial impregne su masa con agua, induciendo y provocando 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, constituidos principalmente por andesitas.

Las avalanchas ardientes o lahares impulsados y lubricados por gases calientes se originan en erupciones paroxísmicas de extraordinaria violencia. Se generan y descienden con velocidad de decenas de kilómetros por hora, cuando se desintegra un tapón volcánico caliente, irrumpiendo, en ocasiones, hasta la parte superior de la cámara magmática del volcán. A raíz de tales erupciones se han creado los depósitos uniformes, estratiformes y de separación columnar de piedra cantera que se encuentran en el Santuario de los Remedios en el municipio de Naucalpan.

Las nubes ardientes que descendieron de la Sierra de las Cruces formaron depósitos de tobas columnares al norte de Cuajimalpa. En algunas zonas no fueron lo suficientemente calientes como para producir ignimbritas, o sea tobas fuertemente soldadas, sólo produjeron tobas del tipo sillar.

La vida de un volcán estratificado como los de la Sierra de las Cruces se manifiesta a través de decenas de milenios. Después de una erupción violenta que dura algunas semanas, se interpone un periodo de descanso. En los periodos inactivos se producen fenómenos de meteorización y alteración de los estratos de cenizas volcánicas superficiales, estos cambios se deben principalmente a la hidrólisis de los feldespatos, que por el alto contenido de sílice y alúmina, en este caso, precipitan en arcillas y zeolitas, principalmente montmorillonita, heulandita y clinoptilolitas.

Los minerales constituyentes sufren distintos grados de alteración, con la correspondiente formación de arcillas y zeolitas. La formación de suelos está íntimamente ligada a las condiciones climáticas prevalecientes, el resultado de las reacciones formadoras de arcillas y zeolitas depende del ambiente en que se presentan las reacciones de hidratación y los fenómenos como la lixiviación.

La Formación Tarango se compone de la superposición de varios abanicos volcánicos, que alcanza espesores de 300 a 400 metros. Por lo general cada abanico corresponde a la vida activa de un volcán.

Los depósitos de la Formación Tarango se generaron en el Plioceno, tiempo caracterizado por su clima árido, lo cual explica en parte la ausencia de flora fósil en el conjunto estratigráfico de los suelos. Otra conjetura que confirma la existencia de un clima árido en la Cuenca del Valle de México durante la formación de los abanicos volcánicos la constituye la escasez de depósitos fluviales en su conjunto estratigráfico.

Únicamente hacia fines del Plioceno se formaron en las barrancas de las lomas, gruesos depósitos fluviales correlacionables con la Formación Clástica Aluvial del relleno de la Cuenca de México, (ver figura 3).

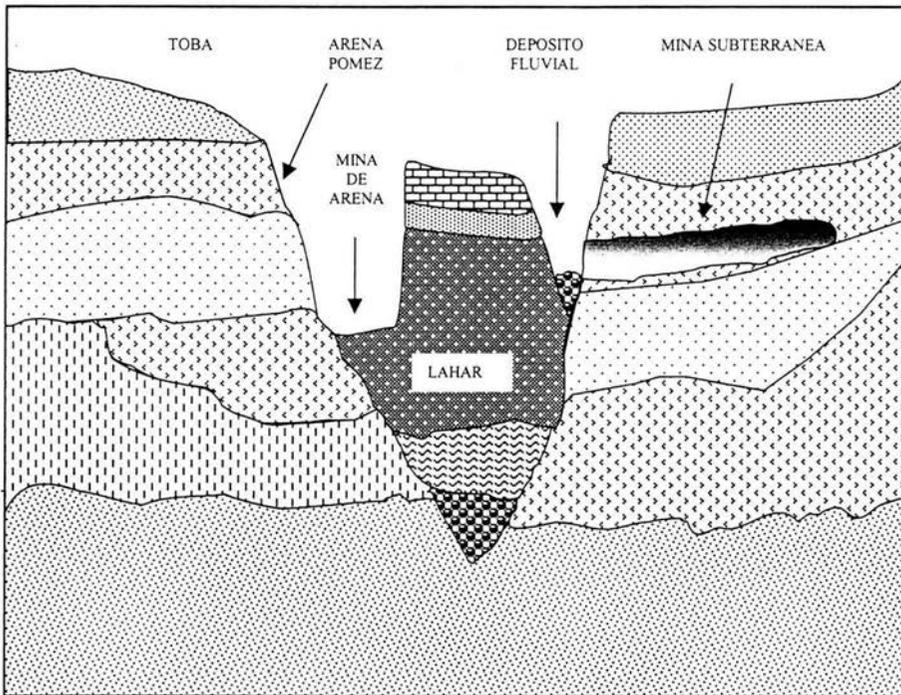


Figura 3.- Barranca erosionada en la Formación Tarango y rellena por un lahar de "arenas azules".

1.2.- ESTRATIGRAFÍA DE LA FORMACIÓN TARANGO.

Las formaciones de la zona de lomas del Valle de México son de origen fluvial y volcánico, se encuentran dispuestas según una secuencia ordenada de acuerdo a su edad.

En la superficie se presentan los suelos orgánicos Totolsingo, que en general son de espesor reducido de 1 a 2 metros, enseguida se presentan los suelos Becerra y Tacubaya, estratificados y con vetas de caliche en la parte superior; subyacen boleos y gravas de forma redondeada a subredondeada, embebidos en una matriz arenosa, comúnmente denominados Serie Clásica Fluvial y Aluvial del Pleistoceno, por último aparecen las tobas y depósitos

piroclásticos de la Formación Tarango, intercalados con capas de pómez producto de erupciones violentas, con distintos grados de intemperismo y zeolitización.

Las lluvias, frecuentes e intensas en el Cuaternario, erosionaron en forma notable los suelos superiores (Tacubaya y Becerra) y la serie Clástica Fluvial y Aluvial, llegando incluso a su total eliminación en amplias áreas.

La estratigrafía identificada y clasificada según los depósitos granulares susceptibles de explotación minera, tiene una gran utilidad, toda vez que las cavidades están restringidas a tales depósitos, además de que las fuentes de materiales con propiedades puzolánicas también se ubican dentro de estos horizontes, mismos que podemos diferenciar y agrupar de la siguiente manera:

- ◆ Horizonte Granular Superior; el correspondiente a las gravas y boleos de la serie Clástica Fluvial y Aluvial, que en áreas reducidas de algunos coronamientos de los lomeríos se detectan con espesores de 3 a 5 metros. Estos horizontes son el resultado de las lluvias del Cuaternario.

- ◆ Horizonte Granular Intermedio: corresponde a los mantos pumíticos de pequeño espesor, en general no mayor de 1 a 2 metros, que en número de hasta 3 se intercalan con notable continuidad en las tobas. En este horizonte se encuentran los principales bancos de tobas, materiales con características puzolánicas, sobre todo si han sido zeolitizados. Estos horizontes son el resultado de las erupciones violentas del Plioceno.

- ◆ Horizonte Granular Inferior: corresponde a las gravas y arenas andesíticas, rojizas y azules, dispuestas en depósitos de gran espesor y continuidad, que comúnmente afloran en el fondo de las barrancas. Estos horizontes son el resultado de los grandes lahares del Plioceno.

CAPITULO 2.- TOBAS: PUZOLANAS NATURALES.

2.1.- PUZOLANAS NATURALES.

Las puzolanas se definen como materiales silicosos o silico - aluminosos que no poseen propiedades cementantes por sí mismos, pero sus constituyentes en presencia de agua e hidróxido de calcio (cal), a temperaturas ordinarias, se pueden mezclar en forma estable como compuestos insolubles con propiedades cementantes.

Las puzolanas naturales mexicanas son materiales de origen piroclástico resultado de erupciones volcánicas explosivas, donde los fragmentos son transportados por aire para ser depositados en la superficie del suelo o del agua. Una vez depositados como materiales incoherentes pueden ser sometidos a procesos diagenéticos que los llevan a transformarse en una roca compacta identificada como toba.

El empleo de las puzolanas naturales como material de construcción se remonta 27 siglos en la historia, se sabe que en el siglo VII A.C. en la isla griega de Santorin, se usó una tierra volcánica para hacer impermeables y más resistentes al agua, las argamasas de hidróxido de calcio destinadas para revestimiento de cisternas.

El hidróxido de calcio es por su naturaleza y versatilidad uno de los materiales más nobles que ha empleado el hombre en sus construcciones. El ciclo de la cal comienza con el cocido de la caliza para obtener cal viva (óxido de calcio); tras su apagado se llega a la cal hidratada (hidróxido de calcio). Posteriormente, cuando se mezclan los materiales puzolánicos, se generan aluminatos y silicatos de calcio hidratados (cementantes), finalmente, después de un tiempo, la cal residual reacciona con el dióxido de carbono del medio ambiente para formar nuevamente carbonatos de calcio (cementante).

La reducción en el uso de la cal como cementante es reciente, sustituida por el cemento Portland fue lentamente olvidada por los constructores y casi desapareció de los procesos de edificación y por consiguiente de los reglamentos de construcción.

Además del ciclo de la cal que inicia con la calcinación de calizas y su apagado en agua, existe otro proceso que produce hidróxido de calcio; la reacción entre carburo de calcio y agua, que genera gas acetileno y una lechada con alto contenido de hidróxido de calcio y agua, dicho material es de gran interés para efectos del presente trabajo y se analiza con mayor detenimiento en el siguiente capítulo.

En la cultura Griega, en Thera se introdujo la mezcla de cal, arena y toba de la "tierra de Santorin". Se obtenían así morteros estables al agua, esta forma de actuar se conocía fuera de la isla, ya que se ha encontrado tierra de Santorin en estatuas de Atenas, donde a falta de tobas se utilizaba ladrillo molido, producto de la cocción de arcillas (metacaolín).

El metacaolín contenido en algunas arcillas cocidas tiene semejanza con las puzolanas naturales. La reactividad puede ser a menudo pequeña o nula, ya que ella depende de la naturaleza de la arcilla y la temperatura de cocción. Los mejores resultados se obtienen a temperaturas por debajo de la de cocción de los ladrillos.

La civilización romana mejoró los procesos de fabricación de la cal y las técnicas de colocación en la práctica de los morteros. Vitruvio es la fuente más completa para el estudio de los elementos constitutivos del mortero de cal (siglo I a. J.C.). Por él sabemos que la mezcla de los materiales se hacía en la proporción de una unidad de cal por tres de puzolana o dos por cinco, según la calidad de la toba.

Vitruvio menciona también el empleo de materiales ya utilizados por los griegos, tales como cenizas volcánicas o ladrillo molido. En efecto, los romanos practicaron a gran escala el añadir a la cal metacaolín y sobre todo puzolanas naturales. Por su estructura porosa, los pequeños fragmentos de tierra cocida convierten a los morteros en más permeables al aire y permiten así una mejor carbonatación de la cal.

Una característica del mortero romano es su excepcional calidad, en su fabricación se tenía mucho cuidado al mezclar los elementos constitutivos. Este mortero se utilizó para cubrir las mamposterías de las paredes y lo llegaron a verter entre dos muros paralelos, que hicieron de cimbra perdida. Toda esta masa era aplastada con mazas para rellenar totalmente todos los intersticios, hasta eliminar las burbujas de aire.

La influencia de la tradición romana retrasó probablemente el descubrimiento de los aglomerantes modernos, ya que en su literatura se insiste en el hecho de que para tener una buena cal, hay que partir de una caliza muy pura. Por tanto, las calizas arcillosas eran sistemáticamente desechadas.

En 1812, Vicat estudió las mezclas de calizas puras y de calizas arcillosas, encontró que las propiedades hidráulicas dependen de los componentes que se forman durante la cocción entre la cal y los constituyentes de la arcilla. Los materiales descubiertos por Vicat pueden ser considerados como productos intermedios entre la cal y el cemento Portland.

El primer concepto de puzolanas proviene de Pozzuoli, puerto italiano ubicado en la bahía de Nápoles, cuyos depósitos y comercio con materiales volcánicos procedentes del Vesubio le dieron fama en su tiempo.

Los cementos hidráulicos, estuvieron constituidos por una mezcla de cal y puzolana natural que los romanos usaron extensamente en obras

principalmente de contacto permanente con el agua, que a pesar de la acción del tiempo aún perduran como testimonio de su calidad, estas puzolanas naturales son de origen volcánico, cenizas ricas en sílice y alúmina amorfas, así como tobas con cierto grado de zeolitización.

Entre dichas obras son de mencionarse los acueductos en el occidente de Alemania y en los Países Bajos, las obras marítimas en los puertos de Brindis, Pozzuoli y obras misceláneas de impermeabilización como las cisternas de la isla de Santorini y la piscina "Mirabilis de César".

En todas ellas se emplearon materiales puzolánicos naturales de origen volcánico, como la toba riolítica de la isla Santorín o las tobas fenolíticas del Vesubio, de las que forman parte los vastos depósitos de Pozzuoli.

De la calidad de éstas obras da testimonio el ensayo de un bloque de mortero puzolánico extraído del muelle en Civitavecchia, construido en el siglo I de nuestra era y que después de 1990 años de estar sujeto a la acción del agua de mar, alcanzó una resistencia a la compresión de 40 kg/cm² aproximadamente.¹

Según las especificaciones de las normas ASTM C 618-72, la puzolana se describe como un material silicoso o silicoaluminoso el cual tiene poco o nulo valor cementante, pero en forma muy dividida y en presencia de agua, reacciona químicamente con hidróxido de calcio a temperaturas ordinarias para formar un compuesto con propiedades cementantes.

2.2.- CLASIFICACIÓN DE LAS PUZOLANAS.

Por su origen, las puzolanas pueden clasificarse en naturales y artificiales; las naturales comprenden principalmente materiales de origen

¹ Portilla C. Pedro, Portilla D. Margarita. "Materiales de Construcción Empleados en la Antigüedad y Similitud con los Empleados en la Actualidad. División de Ciencias Básicas. Facultad de Química. U.N.A.M México. D.F. 1986.

volcánico, pero incluyen también algunas de origen orgánico como las tierras diatomáceas. Las artificiales están formadas por productos del tratamiento térmico de materiales como algunas arcillas (metacaolín derivado de la cocción de arcilla), pizarras y algunas rocas silíceas, así como de cenizas de carbón pulverizado conocidas como cenizas volantes.

Las puzolanas naturales, por tanto, pueden agruparse en dos clases:

- ◆ Las derivadas de rocas volcánicas con material amorfo y zeolitas como constituyentes principales.
- ◆ Las provenientes de rocas o suelos en los que el constituyente silíceo contiene ópalo de la precipitación de la sílice en solución de restos de microorganismos.

En la primera clasificación se incluyen las cenizas volcánicas, arena pómez, obsidiana y tobas. En la segunda se encuentran las diatomitas que existen en la naturaleza con diversos grados de pureza, pedernales, pizarras y arcillas cuando contienen cantidades apreciables de sílice opalina.

Las puzolanas artificiales incluyen a las cenizas volantes, que son residuos de la combustión de carbón usado principalmente en centrales termoeléctricas. Son ricas en alúmina y sílice amorfa, se pueden distinguir de las tobas, principalmente por no contar entre sus fases con arcillas y zeolitas.

Las propiedades aglomerantes de muchos de los materiales incluidos en ambos grupos pueden acrecentarse marcadamente por medio de tratamientos térmicos a temperaturas por debajo de su punto de fusión.

En el caso de las tobas la actividad puzolánica es función de su composición y mineralogía, y ésta a su vez es el resultado del proceso de intemperismo sufrido por el material natural al paso de millones de años. En las

tobas podemos encontrar distintas proporciones de vidrio volcánico, sílice y alúmina en solución, zeolitas, arcillas, sílice cristalina y feldespatos. Cada uno tiene un peso específico sobre las reacciones sufridas al combinar este material con hidróxido de calcio.

El intemperismo de los minerales primarios depositados por las erupciones violentas disuelve la sílice y el aluminio, que en combinación con los diversos cationes alcalinos, también disueltos por el intemperismo, pueden precipitar en forma de nuevos minerales a baja temperatura tales como las arcillas o las zeolitas, este proceso es llamado neoformación.

Los minerales secundarios de neoformación, de particular importancia en las reacciones puzolánicas, son controlados por la intensidad de lixiviación del medio ambiente local del suelo. El clima árido, en cierta medida permite la acumulación temporal de los productos solubles de la reacción de intemperismo, con la correspondiente formación de arcillas o zeolitas a poca profundidad.

Las tobas mexicanas empleadas como puzolana, tienen como primera característica común una alteración importante en sus constituyentes (piroclastos y matriz) en donde un proceso destacable es la zeolitización. Estos materiales tienen una gran capacidad para producir esta transformación diagenética. La clinoptilolita es la zeolita dominante y se puede formar en un sistema semi-cerrado como resultado de la actividad del agua intersticial.

“Los materiales zeolíticos identificados por Difracción de Rayos X, son la clinoptilolita, heulandita y gmelinita. Es claro que existe la asociación importante entre la alteración de la matriz vítrea de estas tobas con la presencia de un par de especies mineralógicas de origen diagenético de tipo

zeolítico, evidencia que ha sido demostrada en pruebas de laboratorio por Sersale".²

Por medio del análisis de Difracción de Rayos X, Rodríguez Camacho, identificó los siguientes constituyentes en algunas muestras de tobas volcánicas mexicanas: feldespatos, cuarzo, minerales arcillosos del tipo clorita-montmorillonita y zeolitas tales como clinoptilolita, heulandita y gmelinita.

El sílice amorfo presenta mayor solubilidad que el cristalino, lo cual se expresa por medio de la siguiente ecuación.



Sin embargo, debido a que el Si(OH)_4 es un ácido débil, su reacción de disociación no ocurre sino hasta valores de Ph mayores a 9.5. Esto nos indica que **la solubilidad de la sílice ocurre a valores mayores de Ph 9**. Por otro lado el cuarzo, una formación cristalina de la sílice, es mucho menos soluble que la sílice amorfa. En soluciones alcalinas, la solubilidad del Al y Si incrementa con el Ph.

La velocidad con la que un material silíceo se combina con hidróxido de calcio depende de varios factores, algunos de los cuales no se conocen con claridad. Aparentemente, cualquier material silíceo independientemente de su estado mineralógico, puede combinarse con el hidróxido de calcio a temperatura ordinaria, esto se explica porque el hidróxido de calcio produce un incremento en el Ph, mismo que favorece la disolución de la sílice. La estructura de los compuestos afecta la velocidad de la solubilidad siendo más lenta para los minerales con estructura cristalina eléctricamente neutra como el cuarzo, aumentando para las cenizas volcánicas amorfas con estructura eléctricamente neutra. La mayor velocidad de disolución se observa en las estructuras porosas con capacidad de intercambio catiónico como las zeolitas.

² Rodríguez Camacho Rosa Elva, et. al, en Revista Construcción y Tecnología, Instituto Mexicano del Cemento y el Concreto, Julio de 2000.

La velocidad de reacción es importante en la reducción de riesgos por subsidencia y por ello se considera menos importante la aportación de las fases cristalinas a la solución del problema, a pesar de que a largo plazo pueden contribuir en la resistencia.

A continuación se profundizará un poco más en las fases presentes en las tobas, las que aportan resistencia acorde con las necesidades del problema de subsidencia y las que no participan fuertemente en la resistencia, pero que su presencia debe considerarse para hacer más efectivo el proceso de reducción de riesgos.

2.3.- ZEOLITAS.

Las zeolitas forman una gran familia de minerales que son objeto de investigación y estudio desde hace más de 250 años. El término zeolita, proviene de las palabras griegas "zein" (hervir) y "lithos" (piedra) y significa "piedra que hierve". Se obtienen por dos métodos: mediante síntesis química (sintéticas) y las que ocurren de manera natural.

Se reconoce la formación de zeolitas a menudo en cantidades muy grandes en tobas vítreas en asociación con montmorillonitas. Actualmente, se tiene conocimiento de que estos minerales ocurren en rocas con diversas edades, litologías y ambientes geológicos. Se localizan en ambientes que incluyen: yacimientos sedimentarios, sedimentos marinos, cavidades basálticas, tobas y en rocas metamórficas de bajo grado.

Hoy en día, se conocen alrededor de 150 zeolitas sintéticas y 48 zeolitas minerales. La definición más simple de una zeolita natural o mineral es la siguiente: se trata de una estructura cristalina de aluminosilicatos hidratados de los metales alcalinos y/o alcalino- térreos.

Las zeolitas cuentan con propiedades que las hacen únicas, éstas consisten principalmente en: **cación intercambiable**, adsorción y tamiz molecular, deshidratación y rehidratación.

De todas estas propiedades, las que más nos importan para los fines del presente trabajo es la naturaleza de ion cambiante y adsorción, clasificadas entre 1850 y 1852 por Way y Thompson.

Una definición de zeolita dice que se trata de un aluminosilicato, con una estructura que encierra cavidades que ocupan grandes iones y moléculas de agua, ambos con considerable libertad de movimiento, de tal modo que permiten el cambio de ion y la deshidratación reversible.

Otra definición más simple, para una zeolita natural o mineral es la siguiente: una zeolita es un aluminosilicato, cuya estructura contiene canales llenos de agua y cationes cambiables. Son altamente cristalinas e hidratadas, desarrollando un cristal ideal, con una estructura de poro uniforme.

Una definición más completa es la siguiente: una zeolita mineral, es principalmente un aluminosilicato, con una estructura tridimensional compuesta por tetraedros de AlO_4 y SiO_4 , eslabonados a otros por compartir todos los oxígenos, en formas interconectadas de jaulas y canales que contienen moléculas móviles de agua y cationes alcalinos (Na, K, Li) y/o alcalino-térreos (Ca, Mg).

Una zeolita se distingue de otra, gracias a las diferencias estructurales de sus respectivas celdas unitarias. La red de cualquier celda unitaria en una zeolita, la constituyen los tetraedros que se ordenan de acuerdo a combinaciones variadas. Su característica más importante está dada por su estructura abierta, a ésta se deben sus propiedades, incluyendo la de intercambiadores de iones.

De manera general, las zeolitas naturales son blancas o incoloras, cuando se presentan libres de impurezas, pero en algunas ocasiones son color carne, rosa, marrón o gris. Su densidad varía de 2.0 a 2.3 gr/cm³.

Las unidades constructoras fundamentales en una zeolita natural, son los tetraedros de SiO₄ y AlO₄. Estos tetraedros, se forman con un átomo de silicio en el centro y cuatro de oxígeno y constituyen el ion ortosilicato; es un ion porque faltan cuatro cargas eléctricas para estar en equilibrio, por lo que se asocia para compensar esta carga.

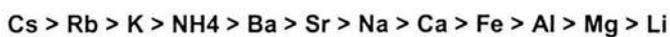
En el centro de cada tetraedro se encuentra un átomo de aluminio o de silicio y sus átomos de oxígeno que ocupan los vértices; los oxígenos de los vértices se comparten por dos tetraedros. Si el átomo del centro del tetraedro es un aluminio existe una descompensación de carga, que se equilibra gracias a un catión. Además, cuando en el centro del tetraedro existe un silicio, la fórmula química de la zeolita puede ser Si_nO_{2n} con lo que la estructura es eléctricamente neutra como en el caso del cuarzo (SiO₂).

Los cationes no forman parte de la red de la zeolita y bajo condiciones adecuadas, se pueden intercambiar por otros cationes; **tal intercambio no afecta la estructura cristalina de la zeolita.**

Los fuertes enlaces de la armazón, son los responsables de la alta estabilidad de la estructura y permiten que la misma **no se colapse**, razón por la cual, el agua se mueve sin que sufra alteraciones. Cuando un catión se reemplaza por otro de diferente tamaño o carga, la distribución de los iones en la estructura puede cambiar. Cuando un catión se reemplaza por el equivalente electroquímico de otro catión, la neutralidad de la carga aniónica de la estructura logra mantenerse.

Las zeolitas actúan como intercambiadores de cationes, porque cuando se coloca una zeolita que contiene un cierto catión, en una solución que contiene otro catión, se establece para cada catión una distribución de equilibrio entre las zeolitas y la fase acuosa. Esta distribución de equilibrio se alcanzará rápidamente, ya que la estructura porosa permite la entrada y salida de los iones. En general, **uno de los iones tendrá una mayor preferencia por la zeolita y tiende a concentrarse en ella.**

De tal modo, por ejemplo, si una zeolita con Mg, se sumerge en una solución que contiene iones de calcio, éste y el magnesio pueden intercambiar sus lugares. El calcio entra a los cristales de la estructura mientras el Magnesio se dirige hacia la solución. La zeolita denominada clinoptilolita, una de las más frecuentes en las tobas mexicanas, muestra una baja capacidad de intercambio catiónico (2.25 meq/g), siendo su selectividad de cationes la siguiente:



Dos de las zeolitas más frecuentes en las puzolanas naturales mexicanas son la heulandita y clinoptilolita. La heulandita, rica en sílice, es una de las zeolitas más comunes; de gran distribución en rocas volcánicas, rocas metamórficas, depósitos de tobas alteradas por aguas intersticiales y sedimentos marinos. Pocas especies se describen, por el tamaño en extremo pequeño de los cristales de la heulandita, en tobas y sedimentos marinos profundos.

Se tiene conocimiento de las zeolitas naturales desde hace mucho tiempo, como minerales secundarios que ocurren principalmente en relleno de vesículas y fisuras en rocas ígneas básicas, pero no es sino hasta que se introducen técnicas de investigación modernas, que se identifican como principales constituyentes de las rocas de origen volcánico, como las tobas. La mayoría son producto de la alteración de feldespatos, feldespatoides o vidrio volcánico.

El vidrio volcánico silíceo es el material aluminosilicato que de forma más común sirve como precursor de las zeolitas, la disolución del vidrio silíceo por medio del agua de los poros proporciona los constituyentes necesarios para la formación de las zeolitas.

Se ha enfatizado su formación durante la diagénesis, no por la devitrificación del vidrio en estado sólido, pero sí por la solución del vidrio y posterior precipitación de la solución.

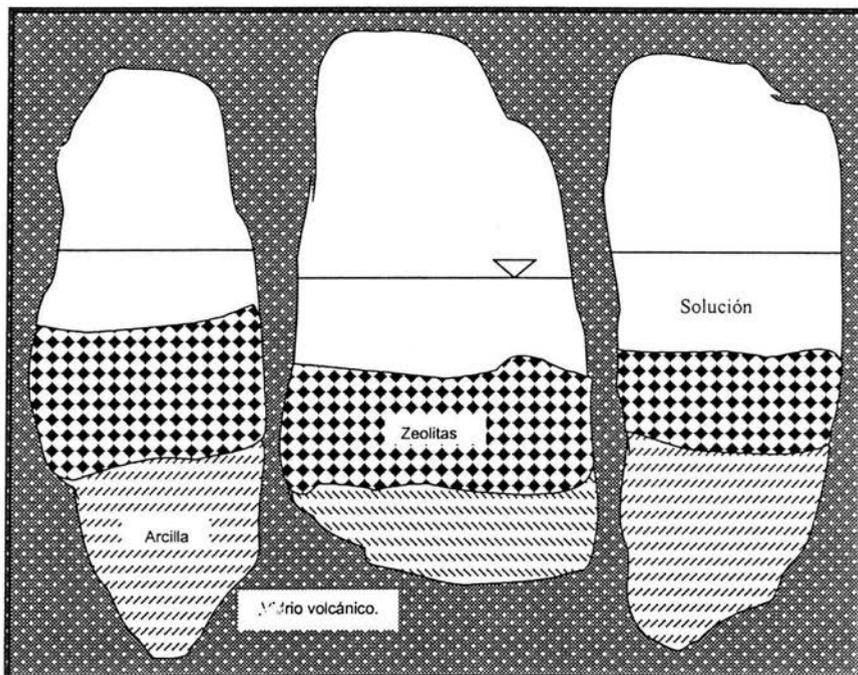


Figura 4.- Esquema del proceso de neoformación de arcillas y zeolitas dentro de vesículas de vidrio amorfo.

Cuando el vidrio volcánico se disuelve en una roca vesicular (como la pumicita), produce una solución en las cavidades, con un contenido de sílice un poco más bajo que el del vidrio.

La cristalización de las arcillas eleva el Ph de la solución (empieza a ser más básica) disminuye la cantidad de aluminio y se crean, entonces, las condiciones necesarias para que las zeolitas cristalicen. Las condiciones básicas favorecen la formación de zeolitas y las condiciones ácidas, por su parte, favorecen la formación de arcillas (ver figura 4).

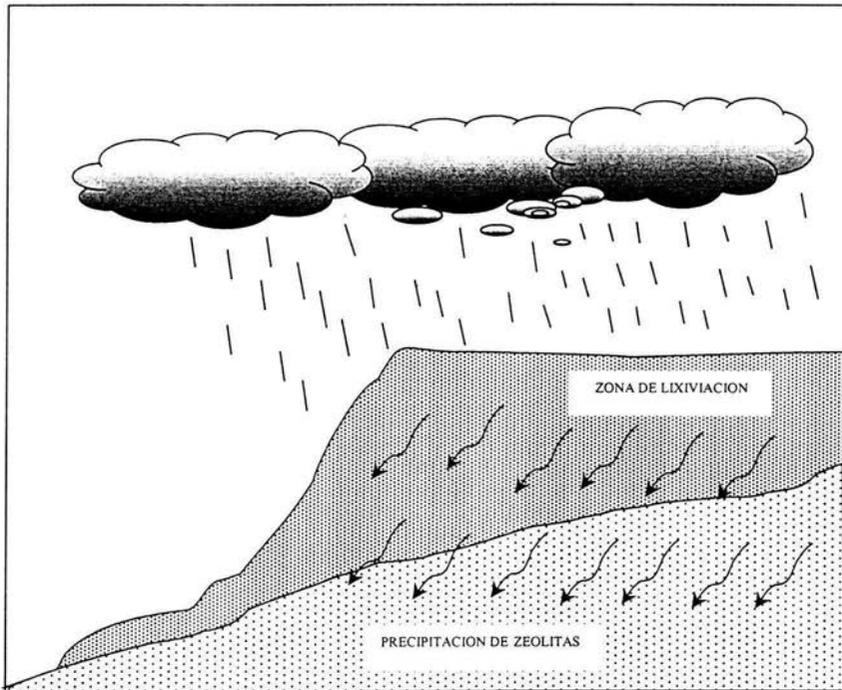


Figura 5.- Esquema del proceso de neoformación de zeolitas dentro de un ambiente de alta precipitación pluvial.

Los eventos volcánicos explosivos producen grandes cantidades de tobas sueltas. El vidrio en las cenizas y materiales piroclásticos se altera mediante diferentes procesos, de los cuales podemos considerar a la hidrólisis como el más importante.

Las zeolitas se pueden formar como producto del movimiento de aguas meteóricas o subterráneas, que se desplazan hacia abajo, a través de los estratos de cenizas volcánicas. Este proceso se refiere a un Sistema Hidrológico Abierto, en el que el agua desciende a través de la roca, cambia su composición y precipitan las zeolitas así como otros minerales. Posteriormente fluye fuera de la roca porosa.

Las cenizas volcánicas y los depósitos piroclásticos, muestran una zonificación vertical (ver figura 5), cuya magnitud depende de la precipitación pluvial, ya que ésta refleja el cambio químico de las aguas meteóricas, moviéndose hacia abajo a través de los depósitos.

Recordemos que los depósitos del poniente del Valle de México se acumularon durante el Plioceno, con un ambiente árido y posteriormente, en el Cuaternario, se presentó el periodo fluvial. Con ello se debe entender que el proceso de lixiviación fue poco intenso como para trasladar los productos de neoformación de minerales muy lejos de la superficie. Por lo tanto, podemos suponer un proceso similar al que encontraríamos en un Sistema Hidrológico Cerrado.

Las especies zeolíticas presentes en tobas alteradas, dependen de la composición de la ceniza. En las tobas ricas en sílice, que derivan de andesitas o riolitas, la heulandita, clinoptilolita y mordenita son los productos zeolíticos más importantes.

La mayoría de las zeolitas de procedencia volcánica fueron formadas, como ya se dijo; por la disolución de vidrio volcánico y su posterior precipitación como cristales de tamaño micrométrico. Las tobas muestran bajo peso volumétrico y son fácilmente desmoronables. Comúnmente contienen entre el 50 y el 95% de una sola especie de zeolita; sin embargo varias zeolitas coexisten con vidrio volcánico que aún no ha sido alterado, es posible

encontrarlas mezcladas con cuarzo, feldespato, montmorillonita, calcita, cristobalita, etcétera.

Las tobas alteradas han sido usadas por mas de 2,000 años como piedras de mampostería de bajo peso volumétrico. Sólo hasta 1950 fue reconocida su naturaleza zeolítica. Su baja densidad, porosidad y homogeneidad han servido para que puedan ser labradas y empleadas como piedras de mamposteo. Por ejemplo, muchas construcciones zapotecas cercanas a la Ciudad de Oaxaca fueron construidas con bloques de toba clinoptilolítica masiva, las cuales fueron empleadas incluso en edificios públicos.

“El labrado de tepetate (sillar de arena pómez) fue fomentado en Atizapán por su estratégica ubicación en la región noroeste del Valle de México que de alguna manera contribuyó a la introducción del ferrocarril de Monte Alto (1892).”³ La zona Sur del territorio municipal en el Cerro de Calacoaya fue la que sufrió mayor explotación manual de materiales labrados de sillar.

Los más importantes materiales puzolánicos empleados por los antiguos romanos fueron tobas zeolitizadas. Materiales similares fueron empleados en la producción de cementos a través de toda Europa. El alto contenido de sílice de las zeolitas naturales y el exceso de cal producido por las reacciones de hidratación del cemento portland, han servido para que sean empleadas como puzolanas, aún más efectivas que la piedra pómez y la ceniza volante. En Estados Unidos, en 1912, durante la construcción de un acueducto cerca de los Angeles California, se logro ahorrar cerca de un millón de dólares remplazando el 25% del cemento Portland con tobas ricas en clinoptilolitas extraídas de minas cercanas⁴.

³ Rodríguez Vázquez Rene. “ Tizapán, raíces de mi pueblo”, Ed. Carmen´s, Tlalnepantla. 1997. P. 65.

2.4.- ARCILLAS.

Las arcillas son constituyentes esenciales de gran parte de los suelos, debido a que son, en su mayor parte, productos finales de la meteorización de los silicatos. Las arcillas aluminosilicatadas precipitan a partir de soluciones silicas, siempre y cuando haya alúmina disponible.

Las propiedades de las arcillas son consecuencia de sus características estructurales, por ello se profundizará en la estructura de los filosilicatos para poder comprender sus propiedades.

Las arcillas, al igual que el resto de los filosilicatos, presentan una estructura basada en el apilamiento de planos de iones de oxígeno e hidróxilos. Los grupos tetraédricos $(SiO)_4$ - se unen compartiendo tres de sus cuatro oxígenos con otros vecinos formando capas, de extensión infinita y fórmula (Si_2O_5) , que constituye la unidad fundamental de los filosilicatos. En ellas los tetraedros se distribuyen formando hexágonos. El silicio tetraédrico puede estar, en parte, sustituido por $Al + o Fe +$.

Estas capas tetraédricas se unen a otras octaédricas. En ellas algunos $Al + o Mg +$, pueden estar sustituidos por $Fe +$. El plano de unión entre ambas capas está formado por los oxígenos de los tetraedros que se encontraban sin compartir con otros tetraedros.

Una unión similar puede ocurrir en la superficie opuesta de la capa octaédrica. Así los filosilicatos pueden estar formados por dos capas: tetraédrica más octaédrica y se denominan bilaminares, 1:1, o T:O; o bien por tres capas: una octaédrica y dos tetraédricas, denominándose trilaminares, 2:1 o T:O:T. A la unidad formada por la unión de una capa octaédrica más una o dos tetraédricas se la denomina lámina.

⁴ Frederick A. Mumpton, "La Roca Mágica: Uses of Natural Zeolites in Agriculture and Industry", Paper Presented at National Academy of Sciences colloquium "Geology, Mineralogy, and human Welfare", November 9, 1998.

En algunos filosilicatos (esmectitas, vermiculitas, micas, etcétera.) las láminas no son eléctricamente neutras debido a las sustituciones de unos cationes por otros de distinta carga. El balance de la carga se mantiene por la presencia, en el espacio interlaminar, o espacio existente entre dos laminas consecutivas, de cationes (como por ejemplo en el grupo de las micas), cationes hidratados (como en las vermiculitas y esmectitas) o grupos hidroxilo coordinados octaédricamente, similares a las capas octaédricas, como sucede en las cloritas. A éstas últimas también se las denomina T:OT:OT o 2:1:1. Los cationes interlaminares más frecuentes son alcalinos (Na y K) o alcalinotérreos (Mg,Ca).

Las fuerzas que unen las diferentes unidades estructurales son más débiles que las existentes entre los iones de una misma lámina, por ese motivo, los filosilicatos tienen una clara dirección de exfoliación, paralela a las láminas.

La importancia de estos minerales radica en sus propiedades fisicoquímicas. Dichas propiedades derivan, principalmente de:

- ◆ Su tamaño de partícula extremadamente pequeño (inferior a $2\ \mu\text{m}$).
- ◆ Su morfología laminar. (filosilicatos).
- ◆ Las sustituciones isomórficas, que dan lugar a la aparición de carga en las láminas.
- ◆ La presencia de cationes débilmente ligados en el espacio interlaminar.

Como consecuencia de estos factores, presentan, por una parte, un valor elevado del área superficial y, a la vez, la presencia de una gran cantidad de superficie activa con enlaces no saturados. Por ello, pueden interaccionar con muy diversas sustancias, en especial compuestos polares, por lo que tienen comportamiento plástico en mezclas arcilla-agua con elevada

proporción líquido/sólido y son capaces en algunos casos de hinchar, con el desarrollo de propiedades reológicas en suspensiones acuosas.

La existencia de carga en las láminas se compensa, como ya se ha citado, con la entrada en el espacio interlaminar de cationes débilmente ligados y con estado variable de hidratación, mismos que pueden ser intercambiados fácilmente mediante la puesta en contacto de la arcilla con una solución saturada en otros cationes, a esta propiedad se le conoce como Capacidad de Intercambio Catiónico, similar a la observada en la zeolitas, con la salvedad de que en las arcillas el Intercambio Catiónico modifica el espacio entre laminas. Recordemos que en las zeolitas, los fuertes enlaces de la armazón permiten que la estructura no se colapse, permitiendo con ello que el agua se mueva sin que la zeolita sufra alteraciones.

La superficie específica o área superficial de una arcilla se define como el área de la superficie externa más el área de la superficie interna de las partículas constituyentes, por unidad de masa, expresada en m^2/g .

Las arcillas poseen una elevada superficie específica, a continuación se muestran algunos ejemplos:

Caolín	15 m^2/g
Ilita	50 m^2/g
Montmorillonita	80-300 m^2/g

Es una propiedad de las esmectitas (entre las que encontramos las montmorillonitas) su capacidad de intercambio catiónico, toda vez que son capaces de cambiar fácilmente los iones fijados en la superficie exterior de sus cristales, en los espacios interlaminares, o en otros espacios interiores de las estructuras, por otros existentes en las soluciones acuosas envolventes.

La capacidad de intercambio catiónico se puede definir como la suma de todos los cationes de cambio que un mineral puede absorber a un determinado Ph. Es equivalente a la medida del total de cargas negativas del mineral. Estos minerales presentan cargas con dos diferentes orígenes:

- ◆ Permanentes, por sustitución isomorfica dentro de la estructura.

- ◆ Dependientes del Ph, por disociación de grupos superficiales.

Las cargas permanentes, constantes o estructurales se han generado a través de los procesos geológicos, debido a sustituciones isomórficas en las estructuras cristalinas, generalmente negativas debido al reemplazo de átomos de la estructura por otros de menor valencia (magnesio por aluminio, aluminio por silicio). Supone un 80% de la carga neta de la partícula; además es independiente de las condiciones del Ph y de la actividad iónica del medio.

En los bordes, sin embargo, aparecen cargas que son dependientes del Ph del medio y por lo tanto son variables. Surgen de la disociación de grupos superficiales. Estas cargas tan solo se encuentran neutralizadas bajo una cierta condición de Ph, denominada PZC: Punto de Carga Cero (point of zero charge), que depende del tipo de enlace químico involucrado. Cuando el Ph se eleva por encima del PZC, en un medio más alcalinizado, la superficie del borde adquiere una carga negativa.

A continuación se muestran algunos ejemplos de Capacidad de Intercambio Catiónico en miliequivalentes por cada cien gramos (meq/100 g):

- ◆ Caolinita 3-5
- ◆ Illita 10-50
- ◆ Montmorillonita 80-200

La hidratación y deshidratación del espacio interlamilar son propiedades características de las montmorillonitas. Aunque hidratación y deshidratación ocurren con independencia del tipo de catión de cambio presente, el grado de hidratación sí está ligado a la naturaleza del catión interlamilar y a la carga de la lámina.

A medida que se incrementan las sustituciones isomórficas dentro de las láminas de la arcilla se genera exceso de carga negativa en la superficie y a partir de estas cargas desarrolladas se produce la adsorción de cationes, que se comportan como los principales centros hidrofílicos sobre la superficie basal de las láminas del silicato. Estos cationes se asocian con el agua de tal modo que pueden formar dos clases diferentes de complejos de hidratación.

El primero de ellos denominado "complejo de esfera interior" se forma cuando el catión se encuentra directamente unido a la superficie del mineral por un lado, mientras que por el otro se rodea de moléculas de agua.

En el "complejo de esfera exterior" el catión se encuentra rodeado de moléculas de agua (formando un complejo), e interactúa con el mineral a través de sus ligandos (agua).

Se formarán complejos de hidratación muy débiles en el caso de tener cationes alcalinos. Cuando en minerales como las montmorillonitas se encuentran cationes divalentes en su intercapa, el complejo de hidratación formado es capaz de mantener unidas varias láminas adyacentes: estos sistemas reciben el nombre de cuasicristales.

La presencia de cationes monovalentes o divalentes produce marcada diferencia en las cantidades de agua adsorbida y por lo tanto, en la expansión entre láminas. La formación de una doble capa eléctrica sobre la superficie del mineral hace que surjan fuerzas repulsivas que tienden a mantener dispersos este tipo de materiales cuando se encuentran suspendidos en el agua. La

presencia de cationes de diferente densidad de carga y en diferentes concentraciones puede modificar considerablemente las fuerzas repulsivas entre las partículas de la arcilla.

Cuando las concentraciones de electrolito son elevadas, favorecen la compresión de la doble capa eléctrica, disminuyendo el alcance de las fuerzas repulsivas, además, a medida que se agregan cationes de mayor densidad de carga, se produce mayor compresión de la doble capa eléctrica, favoreciendo así una rápida coagulación.

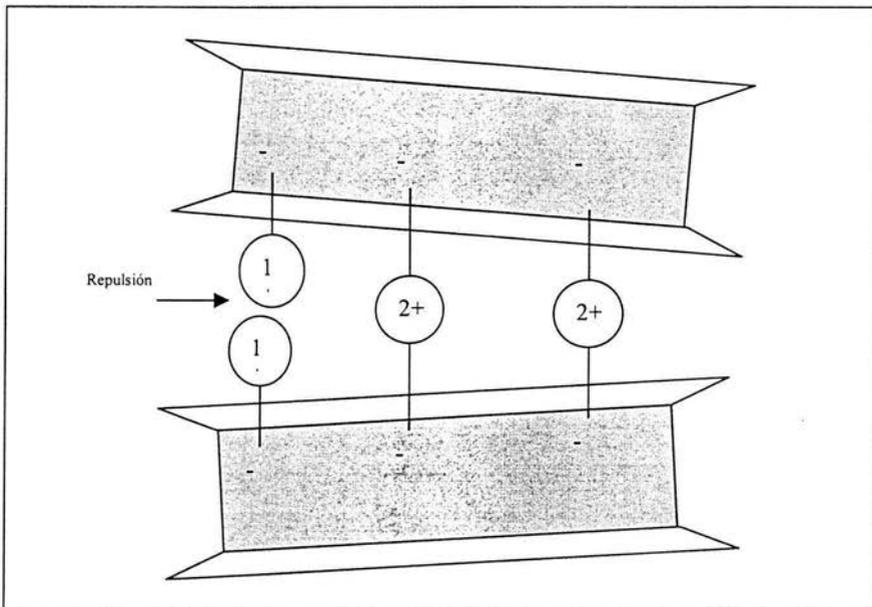


Figura 6.- Esquema de la adsorción electrostática de cationes monovalentes y divalentes en sistemas de partículas apiladas, formando una región interlaminar.

Como las partículas de arcilla se apilan para formar placas empaquetadas, denominadas cuasicristales, la geometría puede favorecer a los cationes multivalentes (2+) (Ver figura 6). En estas partículas laminares apiladas, los iones multivalentes pueden ocupar las regiones interlaminares, mientras que los cationes monovalentes (1) son segregados participando

solamente en las regiones laterales externas de las superficies. Como consecuencia, la formación de cuasicristales promueve la no-reversibilidad del intercambio de cationes monovalentes por divalentes.

La absorción del agua en el espacio interlaminar tiene como consecuencia la separación de las láminas dando lugar al hinchamiento. Este proceso depende del balance entre la atracción electrostática catión – lámina y la energía de atracción del catión. A medida que se intercalan capas de agua y la separación entre las láminas aumenta, las fuerzas que predominan son de repulsión electrostática entre láminas, lo que contribuye a que el proceso de hinchamiento pueda llegar a disociar completamente unas láminas de otras. Cuando el catión interlaminar es sodio, las montmorillonitas tienen una gran capacidad de hinchamiento, pudiendo llegar a producirse la completa disociación de cristales individuales, teniendo como resultado un alto grado de dispersión y un máximo desarrollo de propiedades coloidales. Si por el contrario, se tienen Ca o Mg como cationes divalentes de cambio, su capacidad de hinchamiento es menor. Esto explica la eficiencia en el uso de cal para estabilizar arcillas expansivas.

Como se ha mencionado, el territorio nacional ha estado sujeto a una gran actividad volcánica, durante el Plioceno en la Sierra de las Cruces, lo cual provocó la formación de enormes depósitos de vidrio volcánico con diferentes granulometrías, que a su vez sufrieron un cierto grado de alteración y dieron origen a la mayor parte de las tobas que seguramente contienen montmorillonitas entre sus fases.

2.5.- ANÁLISIS DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X EN POLVOS, REALIZADAS A MUESTRAS DE TOBAS DEL MUNICIPIO DE ATIZAPÁN DE ZARAGOZA.

La actividad puzolánica es función de la composición y mineralogía de las tobas naturales, y esta composición es, a su vez en parte, el resultado del intemperismo de los minerales primarios depositados por las erupciones, el cual disuelve la sílice y el aluminio, que en combinación con los diversos cationes alcalinos, también disueltos por el intemperismo, pueden precipitar en forma de nuevos minerales, también denominados minerales secundarios, como las arcillas o las zeolitas. En las tobas podemos encontrar, en distintas proporciones, vidrio volcánico, sílice y alúmina en solución, zeolitas, arcillas, sílice cristalino y feldespatos.

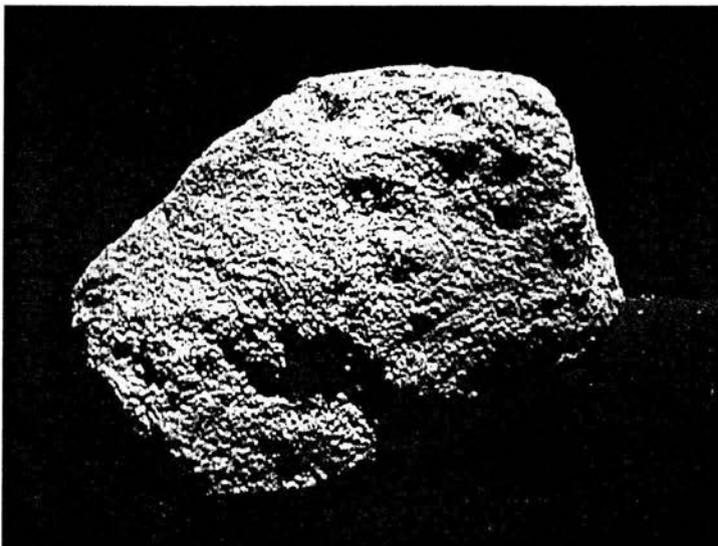


Figura 7.- Toba proveniente del cerro de Calacoaya en el municipio de Atzapán de Zaragoza.

Para el estudio de las propiedades puzolánicas de los suelos naturales se realizaron análisis de difracción de rayos X de polvos en los laboratorios de la Unidad de Servicios de Apoyo a la Investigación (USAI) de la Facultad de Química de la UNAM, tales pruebas se realizaron a dos muestras de tobas provenientes, la primera del Cerro de Calacoaya y la segunda del Cerro de la Viznaga, ambos del Municipio de Atizapán de Zaragoza.

Dichas pruebas se realizaron con la finalidad de comprobar la pertinencia para emplear las tobas de la región como materiales puzolánicos. El objetivo de las mismas fue determinar las fases presentes en las muestras de toba. Con ello se pretendía verificar la presencia de materiales zeolíticos como la clinoptilolita, heulandita y gmelinita, sílice y alúmina amorfos, feldspatos, cuarzo y minerales arcillosos del tipo clorita-montmorillonita.

La técnica de difracción de rayos X es utilizada en la química del cemento para la identificación de las fases presentes. La radiación-X producida con una longitud de onda dada (λ), incide sobre la muestra montada de tal manera que puede girar, con ello, el ángulo de rotación de la muestra (θ) puede hacerse variar. En una cámara se detecta el haz dispersado por el conjunto de planos en la muestra, cuya respuesta se registra para distintos valores de θ .

Los rayos X utilizados para difracción son ondas electromagnéticas con longitudes de onda comprendidas en el rango de 0.05 a 0.25 nm. Para tener una comparación consideremos que una longitud de onda de luz visible es, por ejemplo, 600 nm.

Para obtener rayos X para su uso en difracción, es necesario suministrar un voltaje en torno a los 35 kV, entre un cátodo, emisor de electrones, y un ánodo metálico o blanco, ambos contenidos en vacío. Cuando se calienta un filamento de tungsteno en el cátodo, se liberan electrones y son acelerados a

través del vacío por la diferencia de potencial entre el cátodo y el ánodo, con lo que aumenta su energía cinética.

Cuando los electrones golpean el blanco de metal se emiten rayos X. El origen de esta radiación se explica porque los electrones, por ejemplo de la capa n , son expulsados de los átomos del blanco al ser bombardeado por electrones altamente energéticos. A continuación, algunos electrones de niveles superiores descienden a los niveles inferiores para remplazar a los electrones perdidos, emitiendo energía de una longitud de onda característica.

Cuando un haz incidente de rayos X de longitud de onda dada (λ), incide sobre un conjunto de planos a un ángulo (θ) de tal forma que las ondas que abandonan los diferentes planos no están en fase, entonces se presentan interferencias destructivas y por lo tanto, no se produce un reforzamiento de haz. En cambio si las ondas reflejadas en los diferentes planos están en fase, tiene lugar un reforzamiento del haz, como en la resonancia, con interferencias constructivas que aumentan la amplitud de la respuesta.

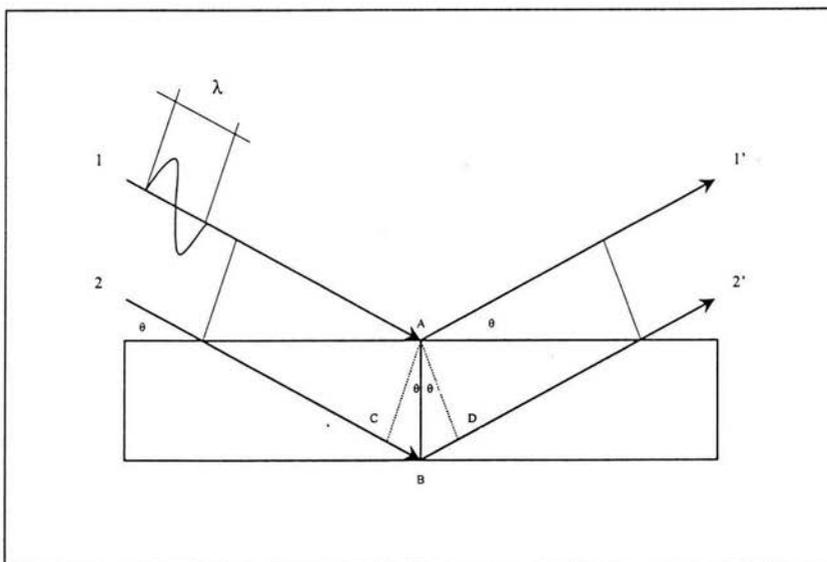


Figura 8.- Criterio de Bragg para la difracción en cristales.

En la figura 8, los rayos 1 y 2 son dirigidos sobre dos planos sucesivos y esparcidos en todas direcciones. De los rayos esparcidos, solamente 1' y 2' llenan las condiciones para difracción, es decir se encuentran en fase. Para ello, la diferencia de recorrido entre los rayos 1A1' y 2B2' es CBD entonces:

$$CBD = CB + BD = 2 AB \text{ sen } \theta = 2 d \text{ sen } \theta$$

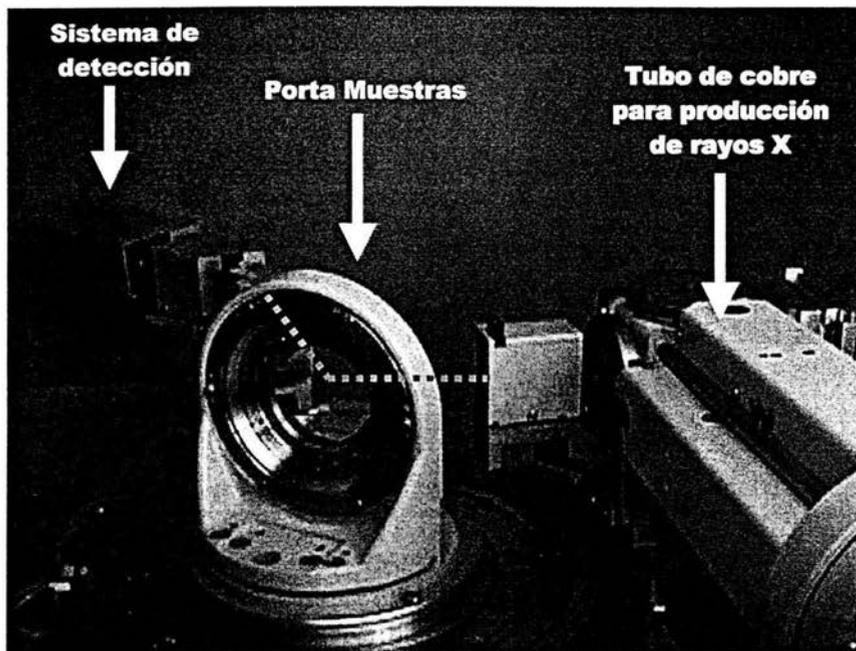


Figura 9.- Equipo de difracción de rayos X para polvos de la USAI en la Facultad de Química, UNAM.

Si estos rayos se encuentran en fase, ésta diferencia de recorrido deberá ser un número entero de longitudes de onda que es la expresión de la Ley de Bragg:

$$2d \text{ sen}\theta = n\lambda$$

d = Distancia entre planos

n = Número entero: $n = 1, 2, 3, \dots$ etcétera.

λ = Longitud de onda de los rayos empleados.

θ = Angulo entre el plano y el rayo.

La ecuación de Bragg establece la relación entre las posiciones angulares de los haces difractados, la longitud de onda λ de la radiación de rayos X incidente y las distancias interplanares de los planos cristalinos d .

La amplitud de onda del haz resultante es la suma de las amplitudes de todos los rayos difractados y aunque la intensidad de la radiación dispersa por cada cristal es muy débil, la contribución de un gran número de ellos origina un haz de rayos difractados bastante intenso. La intensidad del haz difractado, sin embargo, es muy pequeña en comparación con el haz incidente, ya que los cristales difractan tan solo una pequeña proporción del mismo.

Los haces de rayos X difractados son detectados y transformados en señales electromagnéticas, que quedan registradas en un graficador como impulsos o bandas de difracción, con su correspondiente ángulo. El conjunto de bandas produce un espectro de ángulos de los haces difractados y sus intensidades, el cual es comparable con una huella digital que permite la identificación, mediante patrones de comparación, de las fases presentes.

El análisis de difracción de rayos X por el método de muestras en polvo⁵, es la técnica de difracción de rayos X más comúnmente utilizada. En ésta se utiliza una muestra en polvo con el fin de que se produzca una orientación al azar de muchos cristales, que asegure que algunas de las partículas estén orientadas con respecto al haz de rayos X para satisfacer las condiciones de difracción de la Ley de Bragg. La mayor parte de las fases presentes en las tobas se encuentran en forma de partículas muy finas y

⁵ Jenkins Ron, "Introduction to X-ray Powder Diffractometry", John Wiley & Sons, New York, 1996.

debido a esto es que el procedimiento con muestras en polvo es el más adecuado para su análisis.

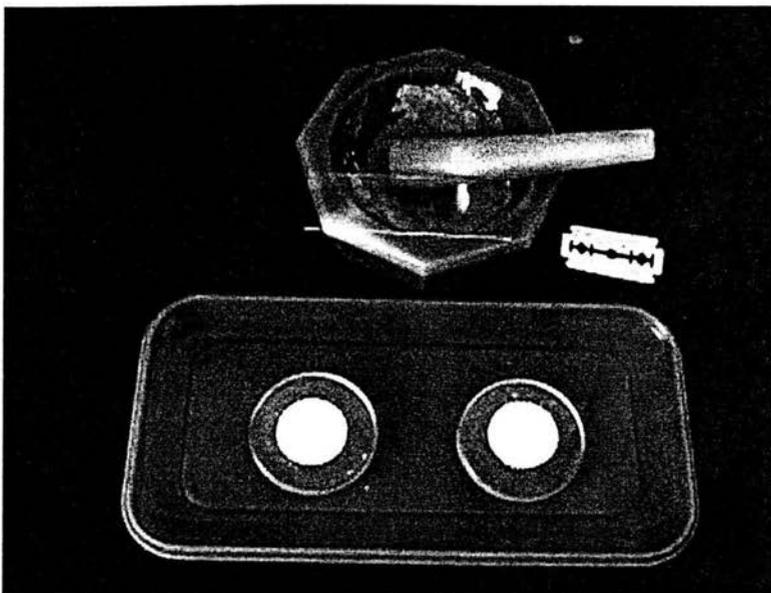


Figura 10 .- Preparación de muestras en polvo para ser analizadas con equipo de difracción de rayos X.

La preparación de las muestras no requiere procesos muy elaborados (ver figura 10). En primer lugar, el material es secado al horno a 50°C, posteriormente es molido en un mortero, para finalmente ser colocado en un porta objetos de vidrio con una ranura semiesférica para contener la muestra al centro. Dicho porta objetos, es a su vez montado en el porta muestras giratorio del equipo de difracción de rayos X. En este caso fue empleado un difractómetro SIEMENS D5000, utilizando radiación $K\alpha$ de Cu ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$) y filtro de Ni, en un intervalo de 2θ desde 2° hasta 90°.

En la muestra de toba proveniente del Cerro de Calacoaya se identificaron las siguientes fases; albita, clorita de calcio, montmorillonita y de forma indirecta material amorfo (en el difractograma se observa una hipérbola).

Con ello podemos apreciar que los procesos diagenéticos han producido arcillas pero no zeolitas. El material amorfo indica que la toba puede poseer propiedades puzolánicas, no obstante su reacción será más lenta que si entre sus faces existieran zeolitas.

La segunda muestra proveniente del Cerro de la Viznaga, fue probada de igual modo, sin embargo en ésta se pudo encontrar heulandita, aunque muy poca.

Con estos resultados podemos notar que las tobas del municipio presentan básicamente material amorfo como principal componente, con propiedades puzolánicas similares a las que pudiéramos observar en las cenizas volantes o en el humo de sílice empleados comercialmente. La mayoría de las propiedades de la ceniza volante en el concreto están determinadas por la mineralogía y el tamaño de partícula de la ceniza.

Existe una diferencia importante entre las puzolanas artificiales como las cenizas volantes y el material que se emplea en el proceso de relleno de minas, esta es que en los primeros se realiza previamente un proceso de molienda, y por tanto se encuentra finamente dividido; en el caso de las tobas empleadas, el proceso previo consiste únicamente en un cribado con tamaño máximo de partícula de 1.00 cm.

El significado que esto tiene es que, como hemos apuntado con anterioridad, el material amorfo reacciona con menor rapidez que las zeolitas, y que por no encontrarse finamente dividida la toba, el tiempo de reacción será más largo y la misma se llevará a cabo únicamente en el exterior de las partículas, quedando el resto como agregado, por lo menos hasta que el hidróxido de calcio penetre los grumos. Podría pensarse en la necesidad de moler la toba, sin embargo éste proceso aumentaría los costos de modo significativo, sin que exista una justificación para ello, toda vez que, como se

verá más adelante, las solicitudes para el relleno son muy bajas como para pensar en la necesidad de rellenos más resistentes.

CAPITULO 3.- ACTIVIDAD PUZOLÁNICA.

3.1.- REACTIVIDAD PUZOLÁNICA DE LAS TOBAS.

Hasta este momento, hemos podido apreciar que muchas puzolanas naturales son de origen volcánico y algunas otras de origen sedimentario. Algunas arcillas y otros materiales pueden emplearse por sus propiedades puzolánicas al activarse mediante tratamientos térmicos. De cualquier forma, las puzolanas naturales y los materiales tratados térmicamente han sido empleados con cal desde tiempos antiguos.

La evaluación de la actividad puzolánica es esencial para decidir si el material puede emplearse en mezclas con cemento Portland. De acuerdo con la norma ASTM –C-618, para utilizarse como aditivo mineral en el cemento Portland, las puzolanas naturales deben cumplir con ciertos requerimientos físicos y químicos. Por ejemplo, los aditivos minerales clase N deben cumplir con un mínimo de 70 por ciento en la suma de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$; en el caso de las puzolanas naturales estudiadas por Rodríguez Camacho⁶, se encontró que contienen entre 76.5 y 86.2 por ciento. Este requerimiento químico es arbitrario con el propósito de tener una relación directa con las propiedades puzolánicas del material.

Es importante verificar el contenido ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$) para calificar el carácter ácido del material puzolánico, lo cual subraya el hecho de que las fases vítreo-activas generalmente son más ricas en contenido de sílice y de alúmina. Las puzolanas naturales mexicanas, según Rodríguez Camacho, muestran un fuerte carácter ácido, con un contenido de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ entre 75 y 83.8 por ciento. Esto se explica porque los principales elementos del eje neovolcánico y por consiguiente de la Sierra de las Cruces, son producto de erupciones por lo

⁶ Rodríguez Camacho Rosa Elva, et. al, en Revista Construcción y Tecnología, Instituto Mexicano del Cemento y el Concreto, Julio de 2000.

general violentas, emitidas por las chimeneas de grandes volcanes andesíticos, riolíticos y ocasionalmente dacíticos estratificados.

Sin embargo Mehta⁷ al referirse a la ceniza volante, y a otras puzolanas, en general, menciona: "en realidad no hay relación directa entre la química de la ceniza volante y sus propiedades en el concreto. La mayoría de las propiedades de la ceniza volante en el concreto están determinadas por la mineralogía y el tamaño de partícula de la ceniza volante, y no por la química de la misma. Es más importante la mineralogía de la ceniza volante, entre el 60 y el 90% de ella es vidrio". Lo anterior se debe a que la disociación de la sílice y de la alúmina es más eficiente cuando la estructura es amorfa, toda vez que los enlaces en el vidrio son más débiles y favorecen la reacción puzolánica.

La actividad puzolánica con cal y cemento representa los principales requerimientos en morteros curados bajo condiciones especificadas. La norma ASTM establece que la resistencia a la compresión mínima a 7 días es de 5.4 Mpa para mezclas cal - puzolana. La puzolanas naturales mexicanas probadas por Rodríguez Camacho mostraron actividad puzolánica con cal que varió entre 4.72 y 6.58 Mpa a los 7 días.

Los depósitos volcánicos del poniente del Valle de México fueron formados de materiales no consolidados, por lo que muestran varios grados de compactación y de alteración química. Como hemos visto, los más consolidados se denominan tobas. No todos los componentes muestran propiedades puzolánicas; los constituyentes más activos son usualmente vidrios ricos en sílice y alúmina con gran número de poros y las zeolitas. Las tobas además incluyen una variedad de minerales con menor actividad puzolánica (por ejemplo cuarzo, feldspatos, piroxenos, magnetita, etc.). Otros constituyentes encontrados, tales como sustancias orgánicas o arcillas, pueden interferir en el desarrollo de la resistencia.

⁷ P.K. Mehta, "Concrete, Flyash, and the Environment – Proceedings", EHDD Architecture and Energy Center. December. 1998.

Las tobas pueden incluir zeolitas como leucita, chabazita, y heulandita. La última de éstas puede presentarse en grandes depósitos con alta pureza. Palacios⁸ al estudiar puzolanas naturales mexicanas encontró que los materiales zeolíticos encontrados en las tobas volcánicas, se dejaron atacar por la cal más rápidamente que las puzolanas vítreas. El material del cerro de la Viznaga contiene heulandita y por ello seguramente reaccionará más rápido que las tobas encontradas en el cerro de Calacoaya.

Algunas arcillas reaccionan significativamente con la cal a temperaturas ordinarias y esta propiedad tiene un valor significativo en suelos expansivos, como se ha visto; se debe al intercambio catiónico con Ca como cationes de cambio, lo cual reduce su capacidad de hinchamiento, no obstante, dicho efecto podría no ser permanente.

Muchos de los materiales de origen volcánico, como las cenizas volcánicas o las arenas pómez, muestran una composición muy similar a las cenizas volantes con bajo contenido de calcio, ambos muestran un alto contenido de vidrio rico en SiO₂ y Al₂O₃ como constituyentes activos. Difieren, sin embargo, en que los materiales derivados de tobas contienen zeolitas como un constituyente activo adicional. Algunas de las puzolanas naturales muestran altas pérdidas por ignición, lo cual se explica, en parte, por la presencia de las zeolitas.

Algunos estudios realizados por Malquori⁹, muestran que las puzolanas naturales consumen hidróxido de calcio, con la formación de productos similares a aquellos que se forman en la hidratación del cemento Portland. En estos estudios se muestra, además, que las zeolitas presentes son mucho más reactivas que los constituyentes vítreos.

⁸ Palacios Maldonado Adrián Héctor, "Reactividad de Puzolanas Naturales". Tesis. UNAM. 1989.

⁹ Malquori, G. In 4^o ISCC, vol. 2, p. 983 (1962).

Por su parte Kitsopoulos et. al.¹⁰ Mencionan que la masa micro cristalina de las tobas del Plioceno en la isla de Santorini en Grecia, son muy ricas en zeolitas naturales, específicamente en heulandita, clinoptilolita y mordenita. La fase dominante es la clinoptilolita que fue formada en un sistema semi – cerrado, por la actividad del agua intersticial dentro de la secuencia volcánica. Los experimentos descritos en su trabajo muestran que la presencia de zeolitas en las tobas de Santorini les dan excelentes propiedades puzolánicas. Dichas tobas fueron calcinadas a 760° centígrados por 12 horas, posteriormente fueron mezcladas con hidróxido de calcio con una relación de 1 parte de cal y 3 de toba calcinada. Como resultado, el hidróxido de calcio libre en la mezcla se redujo de 25% a tan solo el 2.05%.

Hemos visto que las zeolitas son intercambiadores catiónicos, pero las cantidades de CaO que consumen en las mezclas con hidróxido de calcio, son mucho más grandes de las que se pueden explicar por el simple intercambio, además, el intercambio catiónico no puede explicar el desarrollo en la resistencia que ocurre al mezclarlas con cal y agua.

Un estudio realizado por Ivan Janotka y Ladislav Stevula en la Universidad Técnica de Eslovaquia¹¹, sirve como ejemplo de la reactividad de las zeolitas. En tal estudio se realizaron pruebas con suspensiones compuestas por Cemento-Bentonita y Cemento-Zeolita para determinar las diferencias entre ellas frente al ataque de sulfatos. Dicha comparación fue fundamentalmente entre bentonitas sódicas compuestas por Montmorillonitas en un 70% y zeolitas compuestas por un 75% de Clinoptilolitas, ambas fueron mezcladas con cemento Portland y cal adicional. El mayor incremento en la resistencia a la compresión simple mostrado por las zeolitas fue interpretado considerando la alta reactividad de los cristales de la zeolita frente al hidróxido de calcio

¹⁰ K.P. Kitsopoulos y A.C. Dunham, "Heulandite and mordenite – rich tuff from Greece: a potential source for pozzolanic materials" Geology Department, Leicester University, 1996.

liberado por las reacciones de hidratación del cemento Portland, las cuales fueron comparadas a aquellas mostradas por las puzolanas más comunes como el humo de sílice y la ceniza volante.

Las diferencias en la composición y la estructura de las montmorillonitas y las zeolitas son las principales causas que influyen en la resistencia de las mezclas frente al ataque de los sulfatos. Como se ha mencionado, las zeolitas son rocas diagenéticas de origen volcánico donde la clinoptilolita es el producto de la transformación, en un ambiente alcalino, de la ceniza volcánica rica en SiO_2 formando grandes depósitos de tobas zeolitizadas. La estructura de las zeolitas y su capacidad de intercambio catiónico sin alteración del arreglo estructural permiten la absorción de moléculas de diferentes tamaños, con lo que la posibilidad de que las zeolitas reaccionen con las moléculas de cal es superior que en el caso de las montmorillonitas. Lo anterior se confirma con la mayor resistencia a la compresión que se obtiene con las mezclas hechas con zeolitas que con montmorillonitas.

La causa de esta diferencia puede encontrarse en el estudio de las fases detectadas en la reacción, por un lado de zeolitas (clinoptilolitas) con cal y sílice amorfa con cal. En el primer caso, la fase que se encontró en más cantidades fue la tobermorita (silicoaluminato de calcio hidratado), resultado de la reacción entre la clinoptilolita y el hidróxido de calcio. Por otro lado, como resultado de la mezcla sílice amorfa - cal, se encontró vidrio, Ca(OH)_2 y poca tobermorita, lo cual muestra cómo la zeolita tiene una mayor capacidad de reaccionar frente a la cal que la sílice amorfa.¹²

El intercambio catiónico puede ser un proceso inicial, mediante el cual los finos canales de la zeolita son saturados por Ca, con la consecuente liberación, hacia la solución, de los iones inicialmente unidos a la estructura, aumentando

¹¹ Janotka Ivan y Stevula Ladislav, "Effect of Bentonite and Zeolite on Durability of Cement Suspension under Sulfate Attack", en ACI Materials Journal, Noviembre-Diciembre 1998, p.p. 710-715.

¹² Janotka Ivan, Op. Cit.

con ello el Ph alrededor de la sílice de la zeolita. La reacción más importante es aquella en que los aluminosilicatos de la estructura de la zeolita son disueltos (el Ph es mayor a 9) para reaccionar con el hidróxido de calcio, formando posteriormente fases de silicatos de calcio hidratados S-C-H, así como aluminatos hidratados.

La gran similitud química que existe entre las fases que componen las puzolanas naturales y las cenizas volantes sugiere que al mezclarlas con hidróxido de calcio generan productos similares, pero con diferentes velocidades de reacción.

La Stratlingita fue el primer producto sintetizado de la reacción entre hidróxido de calcio y metacaolín en suspensión a temperatura normal. Dependiendo de la composición y de las condiciones, es posible obtener reacciones similares con la formación de stratlingita a partir de otras puzolanas naturales.

Sersale y Orsin¹³ estudiaron la reacción de zeolitas como la chabasita, algunas otras puzolanas naturales y vidrios sintéticos con suspensiones saturadas de hidróxido de calcio a temperaturas normales. En todos los casos, cantidades sustanciales de CaO fueron removidas de la solución, además, las pruebas de Difracción de Rayos X mostraron la formación de silicatos de calcio hidratados S-C-H y una o más fases de aluminatos hidratados.

Las reacciones desarrolladas entre iones de calcio y sílice en suspensión acuosa, a temperaturas normales forman productos intermedios entre gel y cristal. Los más claros ejemplos de estas fases semicristalinas son el S-C-H(I) y S-C-H(II) denominados tobermorita y jennita respectivamente.

¹³ Searle, R. And Orsini, P.G., in 5° ISCC, vol. 4, p.114, 1969.

La tobermorita posee una estructura laminar, ocurre como mineral natural y puede ser sintetizado de reacciones entre hidróxido de calcio y ácido sílico. Cada capa consiste de una parte central, con la siguiente fórmula empírica: CaO_2 , cuyos enlaces están saturados por uniones de tipo Si-O. Que forman ramificaciones que cubren toda la superficie de la lámina. En medio de estas láminas hay moléculas de agua y átomos adicionales de calcio. Algunas de las moléculas de agua están unidas a los átomos de calcio de la parte central de la lámina. La fórmula constitutiva idealizada de la tobermorita es posiblemente $\text{Ca}_5(\text{Si}_6\text{O}_{18}\text{H}_2) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$.

La jennita, por su parte, se puede encontrar en la naturaleza y como la tobermorita puede ser sintetizado de mezclas de hidróxido de calcio y sílice hidratado en suspensiones acuosas. En la naturaleza se presenta en combinación con tobermorita con la que está posiblemente en equilibrio metaestable. Como la tobermorita, también presenta una estructura laminar. El aluminato más común que se llega a formar en este tipo de reacciones es la stratlingita.

Las reacciones de las puzolanas naturales con el hidróxido de calcio, en todos los casos producen S-C-H como la tobermorita y la jennita, así como stratlingita.

Costa y Massazza¹⁴ concluyen a partir de un estudio de varios tipos de puzolanas naturales en reacción con hidróxido de calcio, que dicha reacción depende durante los primeros 28 días del área específica de las partículas de la puzolana¹⁵ (la cual está íntimamente ligada al tamaño de partícula) y a edades mayores de la cantidad de SiO_2 así como de Al_2O_3 en los constituyentes activos.

¹⁴ Costa U. And Massazza, F., in Effects of flyash incorporation in cement and concret (ed. S. Diamond), p. 134, Material Research Society, University Park, PA (1981).

¹⁵ Recordemos que el área específica de la Montmorillonita se encuentra en el intervalo de 80-300 m²/g.

Finalmente podemos concluir, en esta sección, que existen diversas teorías que explican la actividad puzolánica en función de la composición de las tobas (vidrio volcánico, sílice y alúmina en solución, zeolitas, arcillas, sílice cristalino, feldespatos, etc), las cuales no esclarecen completamente el mecanismo de este fenómeno, desde el punto de vista químico, ya que lo contemplan, en gran parte, de acuerdo a las propiedades mecánicas. Estas son:

- ♦ **Teoría del Intercambio Catiónico.**- Se identifica la actividad puzolánica con un origen zeolítico y arcilloso; éste es de intercambio entre los álcalis contenidos en el material zeolítico y arcilloso con la fase acuosa de la mezcla puzolánica. En muchos casos puede ser reversible.

- ♦ **Teoría de la Combinación Directa.**- Admite que se producen reacciones directas entre la sílice y la alúmina activas de una puzolana por una parte y el hidróxido de calcio presente por la otra, dando como resultado la formación de hidrosilicatos e hidroaluminatos de calcio, como la tobermorita, jennita y stratlingita.

Es posible encontrar que el Intercambio Catiónico y la Combinación Directa pueden presentarse actuando en la mezcla a un mismo tiempo. Por un lado en las zeolitas y las arcillas de la puzolana, se presentarán inicialmente Intercambios Catiónicos, mismos que tendrán sus efectos en el comportamiento mecánico de la mezcla, particularmente al reducir el espacio interlaminar de las montmorillonitas. Simultáneamente encontraremos Combinaciones Directas entre los compuestos contenidos en las fases de sílice y alúmina: en solución, amorfo, cristalino y zeolítico, con el hidróxido de calcio. La puzolana provee la sílice y la alúmina necesarias para reaccionar con la cal, para formar silicatos y aluminatos de calcio hidratados, de relativamente baja solubilidad. Estos nuevos compuestos contribuyen a incrementar la resistencia así como para impermeabilizar el medio.

No debemos olvidar que en el caso de las arcillas como la montmorillonita los efectos del Intercambio Catiónico contribuyen ampliamente en el comportamiento mecánico, al reducir la posibilidad de hinchamiento de las láminas de la arcilla.

3.2.- COMBINACION DIRECTA, CARBONATACIÓN Y CRISTALIZACIÓN DEL HIDROXIDO DE CALCIO.

Las reacciones químicas que se llevan a cabo al tratar hidróxido de calcio con puzolánas, están muy poco documentadas en la literatura, se ha encontrado muy poco respecto a estas reacciones, con lo que se muestra en este momento, la siguiente:



- ◆ El $\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ es conocido también como **Tobermorita**.
- ◆ El 3Ca(OH)_2 es conocido también como **Portlandita**.

La tobermorita es la encargada de proporcionar la resistencia a la pasta de cemento. La portlandita es soluble y se difunde en la pasta de cemento haciéndolo permeable.

No obstante lo anterior, la portlandita o hidróxido de calcio residual también sufre procesos que sirven para aumentar su resistencia:

1.- La deshidratación de las suspensiones de hidróxido de calcio provoca que precipiten cristales de portlandita.

2.- Al combinarse con dióxido de carbono forma una sal, el carbonato de calcio. Dicha combinación puede darse en contacto con el aire o con aguas con dióxido de carbono disuelto, dicho proceso se produce en lapsos de tiempo mayores. Esto se representa químicamente del modo siguiente:



El fenómeno de carbonatación es progresivo y lento, pudiendo idealizarse un "frente de carbonatación" que avanza hacia el interior del relleno. Hacia el exterior de este "frente", el Ph es aproximadamente 9 y hacia el interior, se mantiene alrededor de 12.

Cuando la humedad relativa se ubica entre 50 y 70%, es común observar altas tasas de carbonatación, además se ha identificado que el agua subterránea puede contener más de 20 ppm de CO₂, dependiendo de si el ambiente es urbano, rural o industrial, toda vez que la carbonatación ocurre preferentemente en atmósferas ricas en dióxido de carbono.

3.3.- CAL DE CARBURO.

Hemos visto cómo los materiales puzolánicos naturales provenientes de los depósitos de tobas del poniente del Valle de México, pueden ser empleados para producir silicatos de calcio hidratados S-C-H y aluminatos de calcio hidratados al combinarse con hidróxido de calcio y agua.

Por ello, las fuentes alternativas de hidróxido de calcio son importantes para el abatimiento de costos en los procesos de reducción de riesgos por subsidencia en las zonas minadas. Una fuente de hidróxido de calcio, poco aprovechada en nuestro país, es el residuo no peligroso que se puede obtener de las plantas industriales dedicadas a la producción de gas acetileno a partir de carburo de calcio.

La generación de acetileno en la Zona Metropolitana del Valle de México a partir de carburo de calcio se realiza mediante su reacción con agua en un reactor de tipo húmedo en por lo menos tres plantas ubicadas al norte de la ciudad. Como resultado se obtiene gas de acetileno y una pasta con alto contenido de agua e hidróxido de calcio denominada Cal de Carburo. Se reconoce que la cal de carburo es un subproducto del proceso acetileno – carburo. Este producto no es aprovechado, en muchos casos, provocando con ello grandes problemas a las empresas para la disposición final de este subproducto considerado no peligroso. Para lo cual se recabaron los resultados de análisis realizados por empresas certificadas ante el SINALP.

En esta pasta es frecuente encontrar concentraciones de sólidos, al salir del generador, que varían entre el 10 y 12%. Sin embargo es posible obtener concentraciones en esta lechada del 30 o 40% de sólidos mediante procesos de decantación o a través de un compactador. Con procesos de asentamiento prolongado es posible obtener concentraciones de hasta un 45 o 50% de la fase sólida. En algunas operaciones comerciales, en otros países, se han logrado concentraciones hasta del 60% con el uso de una centrifuga. El hidrato con 60% de contenido de sólidos puede ser calcinado en un horno rotatorio para producir óxido de calcio de alta calidad.

Se destaca que la cal de carburo tiene un tamaño de partícula extremadamente fina y puede producirse en forma de tabletas o en forma de aglomerado.

La generación de acetileno en generadores "secos" produce un hidróxido de calcio seco de nivel comercial y de extrema fineza, con una alta calidad química, esencialmente libre de impurezas grumosas.

Comercialmente el producto del generador seco está limitado en disponibilidad, debido a que la producción de acetileno y cal de carburo, es

predominantemente por vía húmeda. En la zona metropolitana no existen plantas que produzcan acetileno con generadores secos.

Existen ligeras variaciones en el análisis químico y la presencia de material extraño, existirá dependiendo de las condiciones locales en el punto de producción.

La cal de carburo, rica en hidróxido de calcio, tiene un color grisáceo y un olor característico de acetileno. Después de que sale del generador, este olor desaparece con el tiempo, pero el color grisáceo resulta principalmente del muy pequeño porcentaje de azufre combinado, contenido en la lechada. También pueden encontrarse en la lechada, contenidos muy pequeños de ferrosilicatos y carbón.

Entre las numerosas ventajas que tiene la cal de carburo es su partícula de tamaño extremadamente pequeño, completamente hidratada y su bajo contenido de magnesio.

Se ha comprobado que es factible bombear la cal de carburo, mediante una bomba centrífuga estándar, en concentraciones tan altas como el 40%. Cuando se almacena en tanques o pozos, la cal de carburo puede alcanzar una consistencia plástica, la cual se puede manejar adecuadamente con equipo mecánico. La cal de carburo en un nivel intermedio de contenido de sólidos, del 40 al 50%, presenta una consistencia semifluida.

Las instalaciones en plantas industriales son provistas, comúnmente, con pozos de asentamiento a desnivel o con tanques elevados equipados con dispositivos para el decantamiento de la cal.

La lechada recién generada encuentra su mayor potencial económico si es empleada en el lugar más próximo a la planta de producción, por ello es de vital importancia que las plantas se encuentren en la zona norte del Valle de

México, próximas a las zonas minadas. Para reducir los costos de transportación al lugar de la obra, es conveniente transportar material decantado con un bajo contenido de agua.

El óxido de calcio o la cal hidratada encuentran múltiples usos en la industria de la construcción, antes de su empleo debe considerarse que es necesario hacerlo reaccionar con agua (apagarla). La formación de hidrato de calcio como subproducto en la reacción de carburo de calcio con grandes cantidades de agua, en generadores de acetileno, asegura que el producto sea completamente apagado.

La especificación ASTM-C5-59 referente a la cal para propósitos estructurales, establece que la composición química debe ser la siguiente:

CaO, mínimo	75%.
CaO más MgO	95%
Sílice y Hierro, máximo.	5%
Contenido de CO ₂ , máximo.	10%

La cal de carburo cumple con esta especificación, presentando la ventaja de contar con un tamaño de partícula extremadamente fina.

Las propiedades físicas del hidróxido de calcio, tales como plasticidad, resistencia y color, son igualmente importantes, la cal de carburo desarrolla estas propiedades de modo adecuado y deben considerarse al emplearlo en la industria de la construcción. El subproducto hidrato de calcio, con el adecuado contenido de agua, generalmente alcanza estos requisitos, excepto donde el color sea un factor crítico.

Morales en 1994 estableció las siguientes características para una muestra tomada de la línea de descarga del decantador:

Estado físico: **Líquido.**

Descripción física: **Lodo.**

Color: **Gris.**

Fase Acuosa: **80%.**

Fase Sólida: **20%.**

Ph Directo a 25° C: **12.313**

El Ph es un dato importante, si recordamos que el SiO_2 se solubiliza a partir de vidrio volcánico a un Ph de 9. Por tal motivo, es posible considerar que la cal de carburo es una fuente adecuada de hidróxido de calcio para su uso en mezclas con puzolanas de tipo natural para la producción de silicatos y aluminatos de calcio hidratados así como para la generación de portlandita o sulfatos y carbonatos de calcio.

3.5.- ANÁLISIS DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X DE POLVOS, REALIZADOS A MEZCLAS DE TOBAS DEL MUNICIPIO DE ATIZAPÁN DE ZARAGOZA, CON CAL DE CARBURO.

Con la finalidad de comprobar que las mezclas, hechas con cal de carburo y tobas del municipio de Atizapán de Zaragoza, producen aluminatos y silicatos de calcio hidratados S-C-H se realizaron pruebas de difracción de rayos X a muestras de prueba utilizando las técnicas anteriormente descritas. La determinación de fases presentes se realizó en tres mezclas de prueba, compuestas de la siguiente manera:

- A) **10%** de toba proveniente del Cerro de la Viznaga de Atizapán de Zaragoza por **90%** de lechada de cal de carburo.

- B) **25%** de toba del Cerro de la Viznaga por **75%** de lechada de cal de carburo.

- C) **40%** de toba por **60%** de lechada de cal de carburo.

Con ello se pretendía verificar las reacciones desarrolladas entre iones de calcio y sílice en suspensión acuosa, a temperaturas normales, la formación de fases semicristalinas como son el S-C-H(I) y S-C-H(II) denominados tobermorita y jennita respectivamente. En general la presencia de silicatos de calcio hidratados, aluminatos de calcio hidratados, materiales zeolíticos como la clinoptilolita, heulandita y gmelinita, sílice y alúmina amorfos, feldespatos, cuarzo y minerales arcillosos del tipo clorita-montmorillonita.

En las mezclas de prueba se encontraron las siguientes fases:

MUESTRA	FASES PRINCIPALES
10% Toba cerro de la Viznaga	Portlandita, cuarzo, óxido de silicio e hidrocalumita

25% Toba cerro de la Viznaga	Portlandita, albita, cuarzo, óxido de silicio e hidrocalumita
40% Toba cerro de la Viznaga	Portlandita, albita, clorita de calcio hidratada e hidrocalumita

Se puede destacar que las fases derivadas de las reacciones entre la cal de carburo y la toba son: en primer lugar la hidrocalumita, un aluminato de calcio, la clorita de calcio hidratada, derivada de la reacción entre montmorillonitas y el hidróxido de calcio, finalmente la portlandita una fase cristalina del hidróxido de calcio.

La preparación de las muestras consistió en secado al horno a 50° centígrados, esta etapa se realizó cuando las muestras tenían 7 días de haberse obtenido, por lo que a ésta edad la reacción entre la toba y el hidróxido de calcio se detuvo por la eliminación del agua en la mezcla.

Las muestras se molieron en un mortero, para finalmente ser colocadas en porta objetos de vidrio con una ranura semiesférica para contenerlas al centro. El porta objetos, es a su vez montado en el porta-muestras giratorio del equipo de difracción de rayos X. Fue empleado un difractómetro SIEMENS D5000, utilizando radiación $K\alpha$ de Cu ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$) y filtro de Ni, en un intervalo de 2θ desde 2° hasta 90°.

La edad de las muestras es un factor importante en los resultados encontrados. El material amorfo reacciona con menor rapidez que las zeolitas y dado que la toba no se encuentra finamente dividida, el tiempo de reacción es más largo y se lleva a cabo únicamente en el exterior de las partículas quedando el resto de la toba como agregado; por lo menos hasta que el hidróxido de calcio penetra los grumos.

Lo mismo se puede decir de la reacción de carbonatación que requiere lapsos mayores para manifestarse. Las zeolitas se encontraron en bajas

cantidades, por tanto, su participación en la reacción es muy limitada. Las montmorillonitas participan en el aumento de la resistencia al intercambiar sus cationes, dado que las concentraciones de electrolito son elevadas, se favorece la compresión de la doble capa eléctrica, disminuyendo el alcance de las fuerzas repulsivas, además, a medida que se agregan cationes, se produce mayor compresión de la doble capa eléctrica, favoreciendo así una rápida coagulación. Finalmente, la portlandita una fase cristalina del hidróxido de calcio favorece el aumento de la resistencia a corto plazo. Por su parte la hidrocalumita un aluminato de calcio, es un cementante que cumple con la misma función.

Es destacable que no se encontraron silicatos de calcio hidratados, lo cual se puede atribuir a que entre las fases de las tobas existen pocas zeolitas y que las reacciones de disociación de la sílice en materiales amorfos, sin un proceso de molienda, se presentan a menores velocidades, por lo que es recomendable realizar pruebas con mezclas de mayor edad.

CAPITULO 4.- SUBSIDENCIA, COLAPSO Y ESTABILIDAD DE TERRENOS MINADOS.

4.1.- SUBSIDENCIA Y COLAPSO DE ZONAS MINADAS

Raymond¹⁶ hace las siguientes consideraciones acerca del origen y naturaleza de las cavidades subterráneas del poniente del Valle de México:

- 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 metros, tanto en altura como en 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 distintos niveles. Donde los materiales eran particularmente aptos para su explotación se llegaron a excavar salones de grandes dimensiones horizontales que, dependiendo de las características de los materiales de su bóveda, podían salvar claros grandes, del orden de 10 metros o más, con alturas de 4 metros en promedio, sin apoyos

¹⁶ Raymond Vignaud, et al, Simposio sobre Cimentaciones en Zonas Minada en la Ciudad de México, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, México, 1976, p.p. 37-38.

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, de donde una o varias porciones de las minas pueden estar parcial o totalmente rellenas por estos derrumbes o sedimentos.

Cuando el hombre rompe el equilibrio de la naturaleza con sus labores mineras en el subsuelo, se producen reajustes gravitacionales de los materiales de la masa de suelo para enfrentarse con las nuevas condiciones y se alcanza un nuevo "equilibrio". Estos reajustes que tienen lugar a lo largo de un periodo de tiempo envuelven el asentamiento, relleno y deslizamiento del suelo hacia el área perturbada.

Las minas en el subsuelo son usualmente estructuras en proceso de rotura; de hecho en muchos casos la minería se lleva a cabo bajo el principio de que el techo fallará, y el problema consiste en llevar el trabajo de tal forma que la falla pueda ser más o menos contenida para que no interfiera en las labores. A diferencia, los túneles se excavan bajo la premisa de que no deben fallar para cumplir una función específica, por lo que los esfuerzos han de ser contenidos para evitar su colapso y deformaciones excesivas. La subsidencia de la superficie se extiende, por lo general, sobre un área mayor que la excavada en las labores mineras.

Se considera que los cambios provocados en el estado de esfuerzos en el medio original a causa de la excavación de una mina o túnel, pueden ocurrir en forma continua o por etapas, hasta que la masa de suelo alcanza un estado de equilibrio relativamente invariable, que en muchos casos se considera equivocadamente el "equilibrio definitivo".

En torno a la excavación se produce una zona de esfuerzos cambiantes, con un aumento en los esfuerzos, principalmente los verticales. Es entendible que los cambios en el estado de esfuerzos no pueden darse sin deformación en el medio. Los procesos de deformación resultantes evolucionan con el tiempo produciendo grietas y separación de bloques, de manera que este último representa una variable de gran importancia en el problema de subsidencia y colapso de las minas que han permanecido durante años sin un revestimiento.

La excavación de una mina no solo cambia los estados de esfuerzos en el interior del medio, sino que en muchos casos, puede cambiar al propio medio. Un gran número de minas de la zona poniente del Valle de México han sido excavadas manualmente en un material que no requiere ningún tipo de ademe para soportarse durante el proceso de extracción, por lo que inicialmente podría pensarse que las perturbaciones de los materiales en torno a la galería de la mina han sido pequeñas durante su explotación.

El carácter de la subsidencia, su extensión y el tiempo que tardará en desarrollarse sobre una excavación en el subsuelo parece que dependen de muchos factores; el más importante es la cantidad de fuentes de suministro de agua, ya sea pluvial, potable o de drenaje, seguido por la vulnerabilidad a dichas fuentes: la profundidad a que está situada, la forma y el tamaño de la excavación; el número y orientación de capas incompetentes, planos de estratificación, fallas y juntas; el método de explotación y las propiedades índice, mecánicas e hidráulicas del suelo. Cuando la mina está relativamente próxima a la superficie, el material suprayacente puede romper prontamente después de la excavación. Si la mina está situada a mayor distancia de la superficie, puede transcurrir un período de tiempo apreciable entre la excavación y las primeras evidencias de la subsidencia de la superficie.

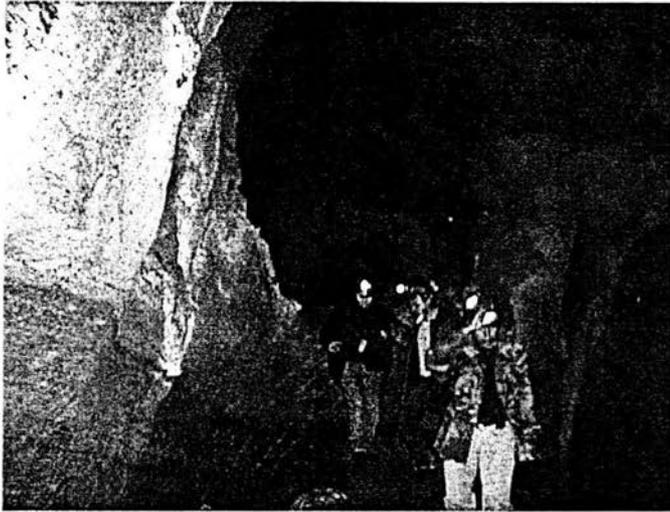


Figura 11.- Vista del interior de un socavón en la colonia Adolfo López Mateos en Atizapán de Zaragoza.

Durante este período el material va desprendiéndose a partir del techo del tajo, formándose un arco que gradualmente avanza hacia la superficie. El material que se desprende del techo de la mina sufre un “abundamiento”. Así, si la excavación es bastante pequeña o profunda, el aumento de volumen del material abundado puede ser suficiente para llenar el arco desarrollado y soportar parcial o enteramente la superficie. Esto siempre y cuando las condiciones hidráulicas no permitan el arrastre horizontal del material desprendido, en cuyo caso, los efectos podrían llegar hasta la superficie en forma de colapsos aislados. Sin embargo, si la excavación es grande, el arco puede avanzar hacia arriba y romper finalmente a través de la superficie. El volumen de la subsidencia es habitualmente menor que el volumen del material quebrantado. Sin embargo, en los casos en que el bloque se hunde como una unidad, los volúmenes pueden ser casi iguales.

Por el hecho de que no se haya colocado ademe posterior a la excavación, se ha producido, seguramente, una relajación de los esfuerzos en la excavación no sostenida, lo cual está asociado a movimientos del terreno.

Una interpretación del problema establece que la subsidencia encima de estratos suavemente buzantes, sujetos a explotación minera, se produce por la flexión de las capas que se comportan como vigas apoyadas en sus extremos con deformaciones en el centro. La flexión origina esfuerzos de tensión cerca de los márgenes del área afectada, en especial cerca de la superficie, formándose grietas verticales de tensión. Las fracturas características de la subsidencia producida por la flexión de los estratos de suelo son grietas verticales de tensión, dichas grietas se encuentran en una zona que se ensancha hacia arriba y se extiende varios metros de la mina en el fondo. Las grietas dividen los bloques que en estos suelos presentan una configuración principalmente columnar y vertical. Estos bloques se pueden derrumbar cuando exista una fuerte cantidad de agua infiltrada, deslizándose y rodando hacia el área excavada. Es posible que éste mecanismo, más que el deslizamiento por superficies de falla, sea de aplicación general en la subsidencia resultante de la explotación de materiales pumíticos en el poniente del Valle de México (ver figura 13).

La discrepancia entre este comportamiento y el que podría esperarse en teoría puede ser atribuido al hecho de que las discusiones teóricas de subsidencia por planos de deslizamiento presupone un material homogéneo, libre de planos de debilidad.

Durante la excavación de túneles, el revestimiento se requiere como forma para mantener las deformaciones en límites tolerables. Deformaciones muy grandes pueden producir subsidencia, que se refleja en los cambios de la superficie del terreno, e incluso pueden generar daños en estructuras próximas, además, las grandes distorsiones suelen producir reducciones indeseables en la resistencia al esfuerzo cortante de los suelos, como consecuencia de degradación estructural.

Aunque el área de subsidencia puede parecer que se mueve como una unidad, en detalle son probables los movimientos de los bloques. Usualmente

el terreno se mueve con lentitud y de forma esporádica con períodos de movimiento repentino alternado con períodos de quietud, lo cual puede tener su origen en los flujos de agua durante la temporada de lluvia.

De esta manera, la falta de un ademe colocado a tiempo ha permitido el desarrollo de agrietamientos y la separación de diaclasas. Por lo tanto, en estas cavidades no es posible esperar ninguna condición satisfactoria de equilibrio final si no se realiza un tratamiento, ello aún cuando inicialmente no hayan presentado ningún signo de inestabilidad.

4.2.- CONDICIONES HIDRÁULICAS.

Las cavidades excavadas décadas atrás han producido cambios radicales en las condiciones hidráulicas del subsuelo. Los túneles son una zona a presión atmosférica, invariablemente el agua tenderá a fluir hacia su interior, por tal motivo, la mina funcionará como un dren permanente.

Por otro lado, según Romero (1997)¹⁷, el funcionamiento del sistema hidrológico subterráneo de la zona es el siguiente: el contenedor impermeable lo constituyen los depósitos de lahar, las andesitas, dacitas o riolitas, en ésta unidad se produce la mayor cantidad de escurrimientos y el agua sólo se filtra en las fracturas que contiene.

Las zonas rellenas con basura y escombros dan origen a una zona permeable y muy porosa, la cual se caracteriza por ser la de más alta capacidad de infiltración, en virtud de que sus componentes son de muy poca consolidación.

Posteriormente se tiene la unidad de suelos (capa edáfica) caracterizada por ser muy permeable y de baja capacidad de infiltración. Se tiene además, una

¹⁷ Romero Estrada Alma Silvia, "El Agua Subterránea y su Impacto en las Zonas Minadas de la Delegación Alvaro Obregon". Tesis. UNAM. 1997.

unidad formada por varios horizontes de toba, de alta porosidad, media permeabilidad y gran heterogeneidad en su constitución; es una zona más receptora que de escurrimiento. Bajo este paquete se encuentra la toba pumítica de alta porosidad, media permeabilidad, formada de material más grueso que el anterior; esta zona es muy receptora, pero transmite el agua muy lentamente.

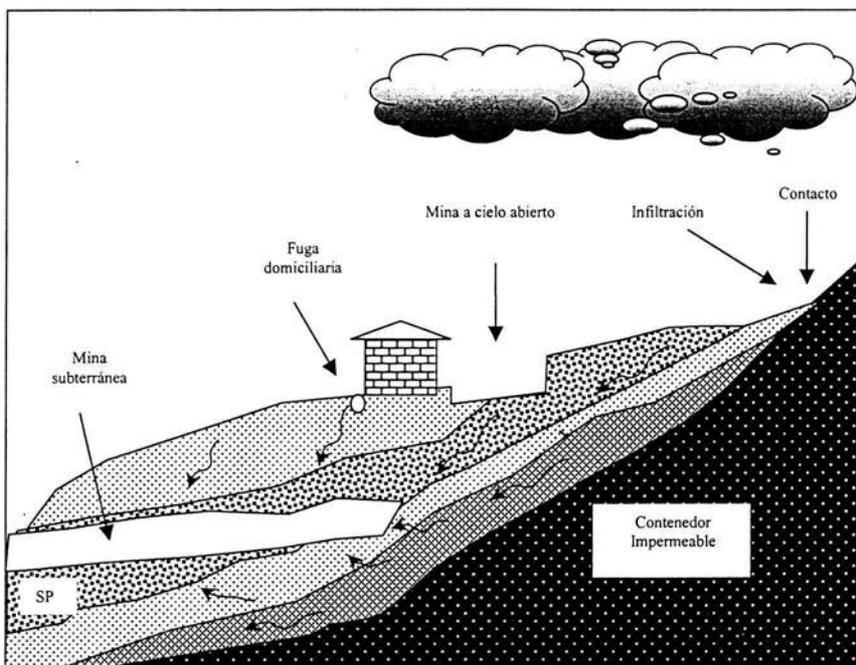
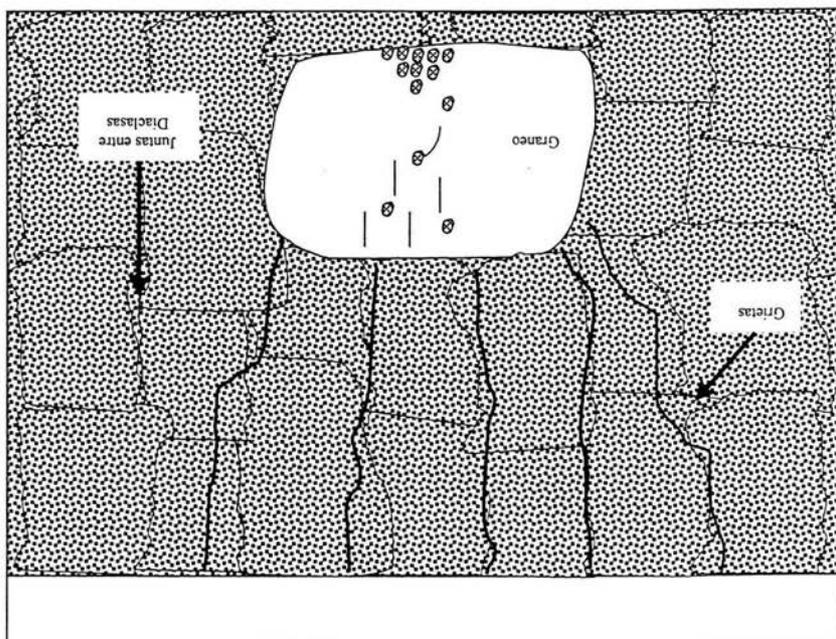


Figura 12.- Esquema de la ladera montañosa, los piedemontes de la Formación Tarango y el sistema hidrogeológico subterráneo.

El agua al introducirse en el suelo, se desplaza a través de estratos u horizontes permeables con componentes más o menos verticales hacia el nivel de saturación. De esta manera, en su tránsito por la zona parcialmente saturada, inunda o reblandece minas o se descarga en las laderas de las barrancas, desestabilizando taludes (ver figura 12).

Los mayores volúmenes de agua que reciben los depósitos de la Formación Tarango, provienen de la lluvia que precipita en la ladera montañosa y en menor proporción los que se captan directamente sobre las superficies de la

Figura 13.- El cambio en el estado de esfuerzos en torno a la cavidad, genera un extenso sistema de grietas, además de una separación de las diaclasas.



Testimonios muy documentados del área, mencionan que todavía a mediados de los años sesentas de este siglo, escurrían numerosos manantiales en algunas laderas. Lo anterior confirma la ocurrencia de un importante flujo de agua subterránea, compuesto, en parte, de la infiltración del agua de lluvia y parte de la proveniente de la infiltración de efluentes domésticos. De esta manera, caudales de agua no conocidos se mueven en estratos arenosos situados a poca profundidad (1 a 40 metros).

los piedemonte, ya que estas zonas se encuentran cubiertas casi en su totalidad por asfalto y concreto.

Como puede constatarse en cada época de lluvia, los volúmenes que escurren por las barrancas que nacen en la ladera montañosa y los que descienden de las lomas por los arroyos transversales a los principales, no solo tienen mayores caudales a causa de las lluvias torrenciales, sino que escurren además con gran velocidad a causa de las pendientes de la ladera y de las superficies cubiertas por la mancha urbana. Es bien conocido que en época de lluvia se acentúa el número de colapsos del terreno en las zonas minadas.

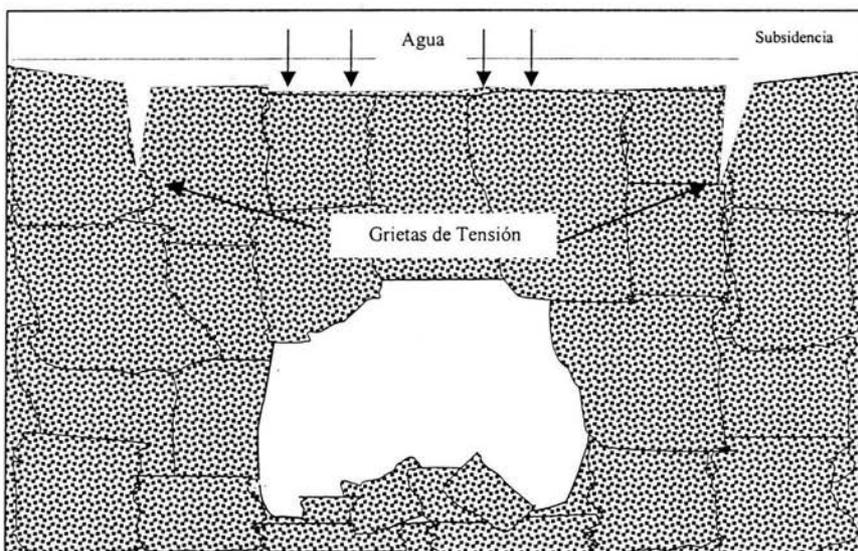


Figura 14.- El agua infiltrada es el principal agente en el proceso de migración y colapso en las minas.

Del agua que precipita y que escurre en las lomas, una fracción minoritaria se infiltra en las superficies no cubiertas, en donde las arenas y las tobas expuestas funcionan como auténticas esponjas dada la alta porosidad de estos materiales.

Bajo estas premisas, el agua infiltrada en las áreas de arena y tobas no cubiertas y en las zonas de minas antiguas, se transmite hasta las minas, rodeadas por la amplia red de fracturas y juntas abiertas entre diaclasas, arrastrando los finos fuera de las juntas y aumentando el movimiento de los bloques, con los consecuentes hundimientos de la superficie; el "graneo" y la migración de bóvedas se acelera y sobrevienen los colapsos (ver figura 14).

Al inicio de las lluvias, en algunas localidades, se ha presentado un aumento de los colapsos que se suceden de manera súbita durante una tormenta. En otros sitios los hundimientos son paulatinos y crecen en cada época de lluvias.

La figura 14 muestra como las depresiones sobre las áreas de subcendencia tienden a recoger el agua, y la naturaleza quebrantada del terreno permite al agua filtrarse hasta la mina. El peso añadido, así como el efecto lubricante del agua, en especial sobre arcillas, tiende a acelerar la subcendencia y en muchos casos actúa como el gatillo que pone en marcha los movimientos repentinos.¹⁸

En las Figuras 13 y 14 se ilustra de forma esquemática, la relación de las condiciones hidráulicas con la dinámica de la migración de bóvedas. Pero la lluvia no es el único enemigo de las construcciones sobre bóvedas de poco espesor, a ella se ha agregado, conforme crecen y se expanden los asentamientos irregulares, el efecto de los vertidos de drenaje por fugas en las tuberías o por predios con su drenaje conectado directamente a las minas.

En algunas colonias del municipio de Atizapán de Zaragoza, se encontró que a pesar de la instalación de drenaje municipal, algunas casas vierten el agua de desecho directamente a las minas. En estas condiciones el agua

¹⁸ Hugh Exton McKinstry, "Geología de Minas". Ed. Omega. Barcelona. 1961, p.p. 671.

negra de desechos domésticos va acumulando, en el mejor de los casos, humedad en los estratos arenosos y en el peor de los casos, inundando túneles y salones. Es claro que este efecto se amplifica en las zonas sin drenaje; las arcillas al saturarse aumentan el volumen y aceleran el proceso de migración.

Por tanto, se puede establecer que, en el caso de la zona poniente del Valle de México, el principal desestabilizador de las cavidades subterráneas de origen artificial, es el agua de lluvia y de desechos domésticos que se infiltra en las capas permeables de la superficie. Las aguas de lluvia y drenaje absorbidas por las arenas permeables, humedecen y reblandecen encapes de poco espesor e inician la percolación y goteo hacia las cavidades.

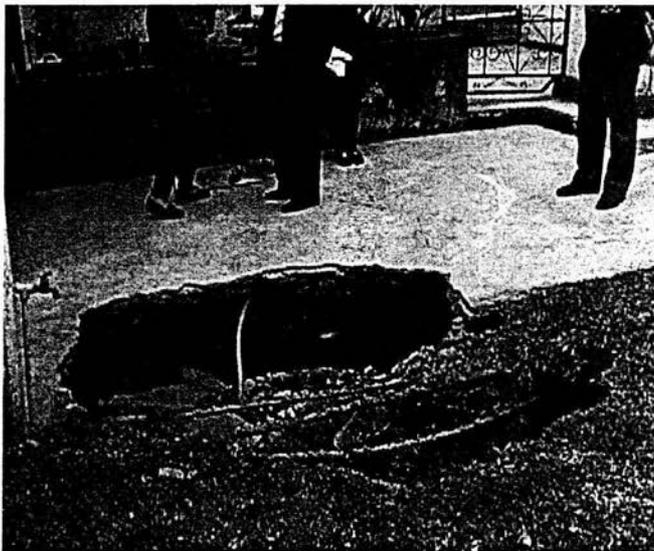


Figura 15.- Colapso de una mina asociado a una fuga de agua potable.

Otras vías de infiltración de agua al subsuelo son las minas a cielo abierto o los rellenos heterogéneos. En estas discontinuidades del subsuelo, la permeabilidad es más grande que la del terreno natural, por lo que el agua,

infiltrada en ellas se almacena y drena rápidamente hacia las cavidades de niveles inferiores. Durante su desplazamiento como en su almacenamiento temporal, el agua aumenta la humedad, y la resistencia al esfuerzo cortante del suelo disminuye, haciendo migrar las bóvedas adelgazando los encapes.

Otras formas de desplazamiento del agua subterránea son los estratos arenosos inclinados hacia las laderas de las barrancas. Cuando el agua en algunas de estas capas alcanza un túnel, su velocidad aumenta consecuentemente la erosión de pisos y pilares.

Aunque el nivel al que se encuentran totalmente saturados los depósitos de la Formación Tarango se encuentra a gran profundidad por debajo del piso de las minas, el desplazamiento del agua infiltrada en superficie hacia el nivel de saturación representa en algunas localidades un riesgo latente.

4.3.- PRESIÓN DE TIERRAS EN MINAS.

Para mantener el orificio practicado por la excavación de la mina, que tratará de cerrarse por sí mismo, se considera que la resistencia del suelo proporciona los elementos resistentes para alcanzar un equilibrio definitivo, lo cual es cierto, si consideramos que los agentes externos no actúan negativamente sobre las condiciones de equilibrio. En el caso de las cavidades mineras del poniente del Valle de México, es necesario emplear elementos auxiliares para evitar que la subsidencia llegue a límites donde se ponga en entredicho la estabilidad de la excavación, ya que como se ha mencionado, al no haberse colocado un ademe, se han desarrollado agrietamientos y la separación de las diaclasas sobre la mina. Se ha observado que el principal desestabilizador de las minas es el agua que se filtra en las grietas y juntas más permeables, retirando los finos y lubricando las uniones de los bloques. Las aguas de lluvia y drenaje absorbidas, humedecen el suelo e inician la

percolación y goteo hacia las cavidades. Por lo tanto se debe realizar algún tratamiento para lograr un equilibrio final.

Las excavaciones hechas en el interior de la masa de suelo crean siempre un vacío hacia el que se posibilitan los desplazamientos; a la vez, el peso de los materiales suprayacentes actúan como una carga repartida sobre el techo de la excavación.

Cuando se afloja la masa de suelo firme sobre el techo de un túnel, por efecto de la excavación y del peso de la carga sobreyacente, el comportamiento puede compararse al de una masa de suelo granular colocada en un silo, cuando en el fondo de éste se abre una abertura.

Esta es la condición de presión que consideró Terzaghi en sus análisis sobre empujes en túneles, de manera que la presión por aflojamiento del material se considera hoy básicamente representada por los mecanismos propuestos por él. La concepción de Terzaghi para el mecanismo de éstas presiones incluye de manera predominante efectos de arqueado en suelos.

Uno de los problemas que consideran las teorías de arqueado más estudiadas es aquel en que un estrato de arena de extensión infinita, pero de espesor finito, descansa sobre una base infinita de la cual cede una sección angosta de longitud infinita; es decir, se analiza un problema de deformación plana.

Existen varios criterios para el cálculo de la presión de tierra generada en las minas excavadas en suelos firmes o duros, la mayoría de ellos basados en el fenómeno de arqueado, el cual es considerado en forma diferente para cada criterio, lo que conduce a resultados diferentes.

Para este caso, la estimación de las cargas sobre el túnel se realizó de acuerdo al criterio propuesto por Terzaghi, el cual analiza el equilibrio de una cuña de arqueo.

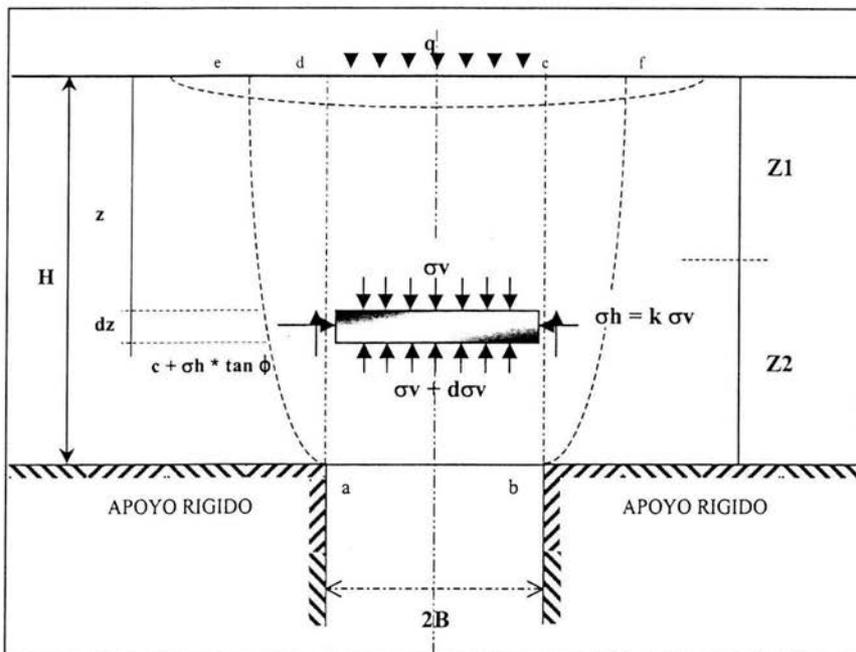


Figura 16.- Esquema del criterio propuesto por Terzaghi para la estimación de cargas sobre túneles.

En esta teoría se supone que las secciones verticales (ver figura 16) ad y bc, que pasan por los extremos de la faja de cedencia son superficies de deslizamiento y que la presión sobre la frontera cedente es igual a la diferencia entre el peso total de la masa colocada sobre esa frontera y la resistencia friccional desarrollada a lo largo de las superficies de fluencia. Las superficies reales de deslizamiento son ae y bf, curvas, según indican los datos experimentales, con una separación mayor en la superficie que el ancho de la zona de cedencia; por lo tanto la fricción a lo largo de las superficies verticales supuestas no puede estar totalmente desarrollada, pues esas superficies no

son, estrictamente hablando, superficies de fluencia. Este hecho produce un error del lado de la inseguridad.

En esta teoría se considera que la resistencia del suelo está dada en general por la Ley de Coulomb:

$$s = c + \sigma \tan \phi$$

Se considera también inicialmente que en la superficie del terreno actúa una sobrecarga q .

En la figura se muestra un elemento prismático de suelo situado a la profundidad z y de espesor dz . El esfuerzo vertical en la cara superior se denomina σ_v y el esfuerzo horizontal, en las caras laterales se supone ser:

$$\sigma_h = K \sigma_v$$

donde K es una constante de presión de tierras.

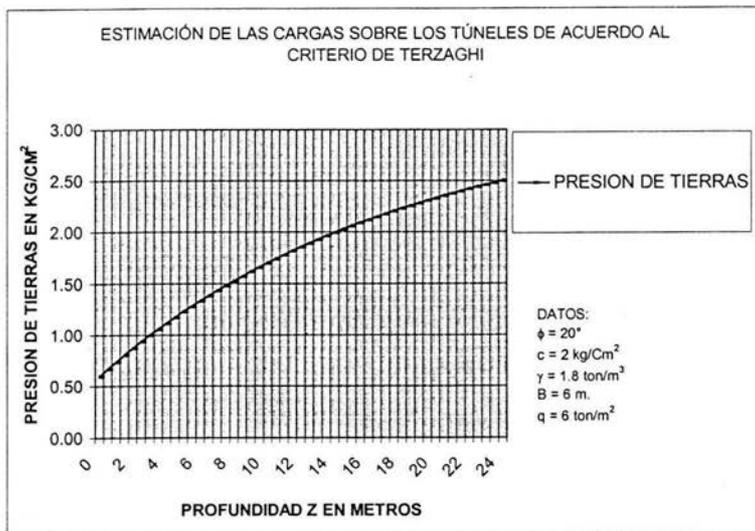
Considerando el equilibrio vertical del prisma elemental se tiene:

$$2B\gamma dz = 2B(\sigma_v + d\sigma_v) - 2B\sigma_v + 2cdz + 2Ks_v + 2K\sigma_v \tan \phi dz.$$

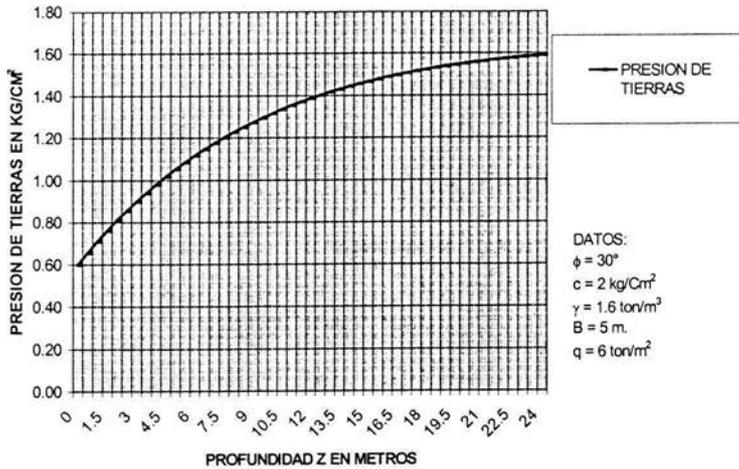
Se simplifica y resuelve la ecuación diferencial lineal de primer orden y primer grado, para lo cual se consideran las condiciones de frontera $\sigma_v = q$, si $z=0$, se tiene:

$$\sigma_v = \frac{B(\gamma - c/B)}{K \tan \phi} \left(1 - e^{-K \tan \phi (z/B)} \right) + q e^{-K \tan \phi (z/B)}$$

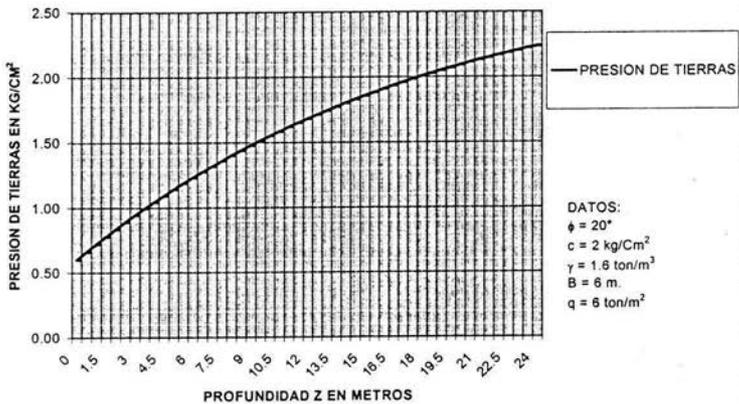
A continuación se presentan tres gráficos donde se aplica la fórmula anterior considerando las propiedades índice y mecánicas de los suelos encontrados en distintos puntos del municipio de Atizapán de Zaragoza, en todos ellos la sobrecarga q es igual a 6 ton/m^2 :



ESTIMACIÓN DE LAS CARGAS SOBRE LOS TÚNELES DE ACUERDO AL CRITERIO DE TERZAGHI



ESTIMACIÓN DE LAS CARGAS SOBRE LOS TÚNELES DE ACUERDO AL CRITERIO DE TERZAGHI



CAÍTULO 5.- PROCESO DE REDUCCIÓN DE RIESGOS EMPLEADO EN EL MUNICIPIO DE ATIZAPÁN DE ZARAGOZA.

Desde 1976, la Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos en el Simposio denominado Cimentaciones en Zonas Minadas de la Ciudad de México recomendaba dar un mayor énfasis al estudio de las propiedades puzolánicas de los suelos naturales con miras a emplearlos económicamente en el relleno de cavidades, sin embargo, no existe evidencia de que hasta 1998 esta recomendación haya sido llevada a la práctica a gran escala en la zona metropolitana. El autor ha venido empleando mezclas hechas con cal de carburo y tobas volcánicas de la Sierra de las Cruces para reducir riesgos por subsidencia y colapso en el municipio de Atizapán de Zaragoza, mediante el proceso que a continuación se describe.

5.1.- ETAPA DE DETECCIÓN Y EXPLORACIÓN DE ZONAS MINADAS.

Debemos recordar que en el estado actual del avance de la técnica, el problema de la detección de cavidades dista mucho de estar completamente resuelto y no existe un método único, eficaz y seguro para este fin.¹⁹

Esta etapa inicia con un reconocimiento superficial del área, con lo cual se definen las características del problema y se programan las etapas subsecuentes.

El reconocimiento consiste en un recorrido detallado de la zona por atender, se presta especial cuidado a las barrancas, cañadas, cortes cercanos

¹⁹ Raymond Vignaud, et al, Simposio sobre Cimentaciones en Zonas Minada en la Ciudad de México, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, México, 1976, p.p. 37.

al predio, áreas de proliferación de árboles del tipo Pirúl (*Schinus Molle*) o con topografía inusual, grietas de tensión en la superficie del terreno y patologías por asentamientos diferenciales en estructuras, se debe investigar la existencia de bocas de mina, así como rellenos, muros o construcciones que pudieran ocultarlas.

En caso de encontrar bocas de mina, se emplean retroexcavadoras para su limpieza ya que en la mayoría de los casos se encuentran obturadas por basura, posteriormente se evalúa cualitativamente el grado de intemperismo para determinar la seguridad antes de realizar una inspección directa.

La inspección tiene como fin determinar el desarrollo de la mina, con una medición sencilla que nos permite estimar hasta donde afecta la misma. El recorrido sirve, también, para conocer el estado y poder programar así el levantamiento topográfico.

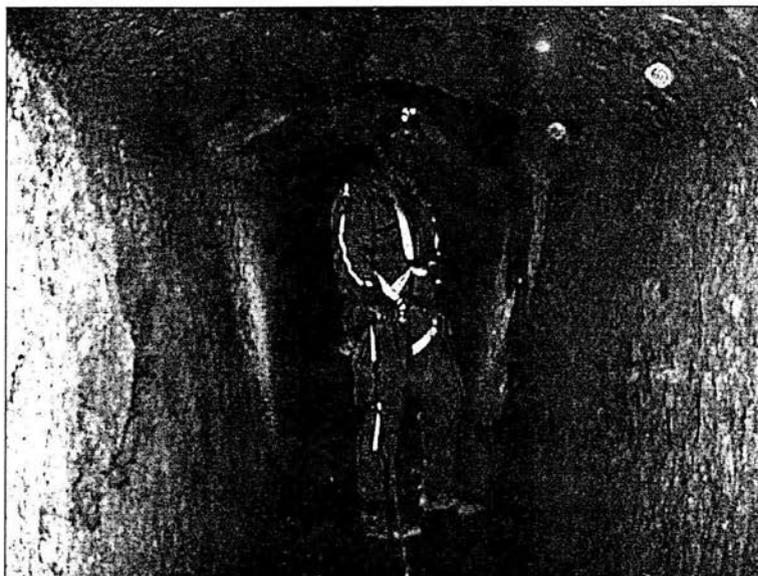


Figura 17.- Inspección de cavidades.

ESTA TESIS NO SALE DE LA BIBLIOTECA

En todos los casos, se recaba información de los habitantes del lugar, entre los cuales es posible encontrar ex trabajadores de las labores mineras. Dicha información es de gran utilidad ya que ha servido para detectar bocas de minas y evidencias superficiales como hundimientos, grietas del terreno, así como daños en las construcciones existentes.

Durante el reconocimiento del sitio, se investiga la ocurrencia de otros problemas comúnmente asociados con las minas, como son la presencia de rellenos superficiales en antiguos colapsos, los cuales 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 falla del techo de minas que de ellas arranque.



Figura 18.- Durante la exploración de las cavidades se deben observar los signos de inestabilidad, tales como bloques caídos y migración intensa de la bóveda.

Después del reconocimiento del sitio, cuando éste determina que es posible de que existan cavidades subterráneas de origen artificial se emplean los siguientes procedimientos:

Sí se localizan bocaminas y las condiciones de la cavidad así lo permiten, se ejecuta el levantamiento topográfico en planimetría de una poligonal por los ejes de las galerías y además se realiza un levantamiento en altimetría, para lo cual se emplea una estación total.

En dicho levantamiento se localizan y refieren aquellas partes de la mina donde existen derrumbes, rellenos y sedimentos depositados por el agua los cuales hacen peligroso el acceso.

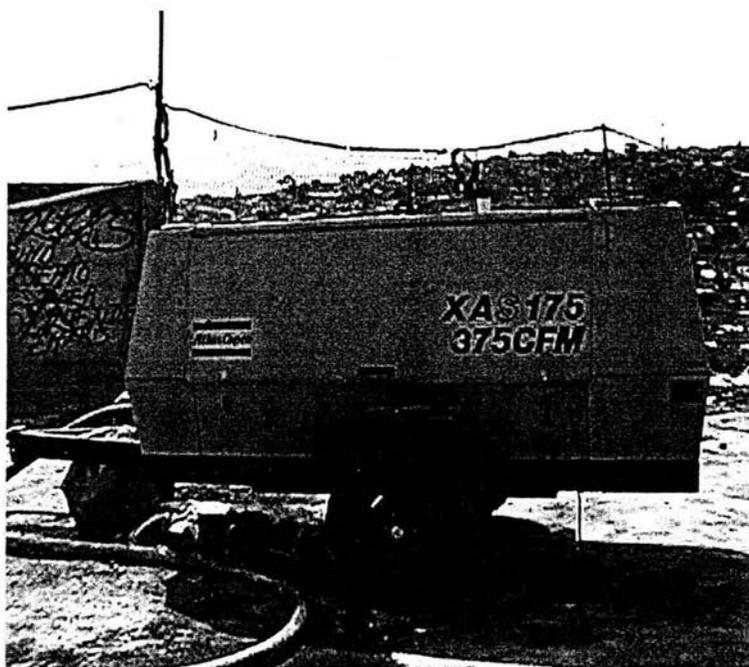


Figura 19.- Compresor montado sobre remolque para equipo de perforación accionado por aire a presión.

En otras ocasiones, las condiciones de la cavidad muestran signos de inestabilidad, tales como bloques caídos, agrietamiento y migración intensa de la bóveda, reducción en la sección de los pilares, socavones que pueden estar obturados por material sin permitir la confirmación directa de la continuidad de la mina, en dichos casos se emplean otros métodos como geofísica con radar de gran penetración, resistividad eléctrica o perforación con broca tricónica de 4 pulgadas de diámetro, empleando un vagón perforador accionado con aire mediante un compresor de 375 pies cúbicos por minuto.

Cuando las condiciones de las minas no hacen factible la exploración directa, completa y satisfactoria, se emplean métodos indirectos; los cuales presentan la ventaja de servir para investigar áreas grandes, su empleo permite definir anomalías que puedan asociarse a cavidades en cuyo caso se hace necesario el empleo de métodos semidirectos como la perforación.

El SIR (Radar de Interfase Subterráneo) es un sistema de radar de propósito general, penetrador del subsuelo, de canal único y portátil. El SIR es de baja potencia y transmite energía electromagnética en un rango de frecuencia 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.

El pulso es generado en la unidad de control con una frecuencia de alrededor de 50 KHz, el tiempo de recepción es de 20 microsegundos para una antena de potencia normal (ver figura 20). El pulso es enviado por la unidad de control a través de un cable al circuito transmisor ubicado en la antena. Cada pulso generado por la unidad de control es transformado, en la antena, en un pulso bipolar con una amplitud mayor que el original. La forma del pulso varía

con el tipo de antena. En el caso que nos ocupa se emplea una antena biestática de 100 Mhz.

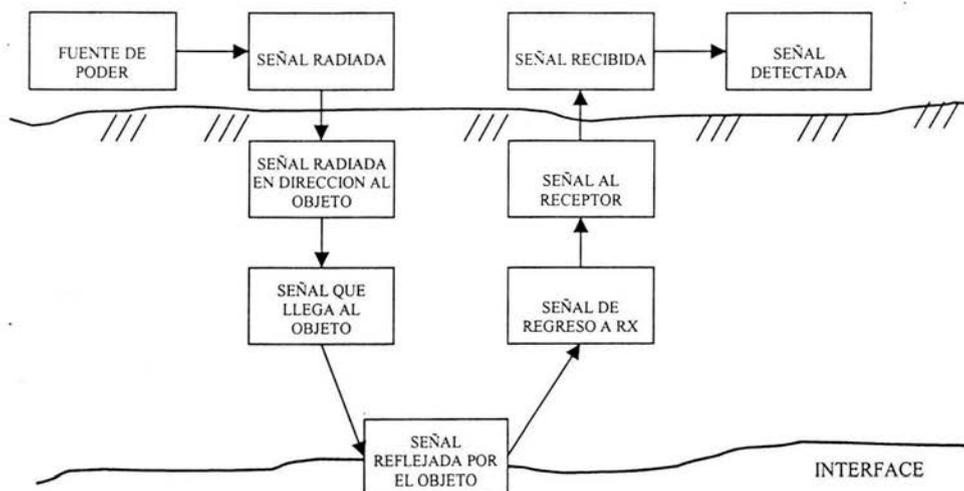


Figura 20.- Esquema que muestra la forma de trabajar del SIR.

El pulso transmitido es radiado de la antena al subsuelo. El tamaño de la antena y las propiedades del subsuelo determinan la frecuencia de la energía propagada. 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.

El receptor de la antena detecta la señal reflejada y la envía de regreso a la unidad de control. En la unidad de control la señal es procesada y desplegada en pantalla.

Existen dos propiedades del suelo que tienen gran importancia cuando se trabaja con el SIR, estas son:

- ◆ Conductividad eléctrica.
- ◆ Permitividad eléctrica (constante dieléctrica).



Figura 21.- Antena del radar de gran penetración.

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, si la conductividad es mayor a 0.01 S/m se presentan condiciones difíciles para trabajar con el SIR.

Existe una división general de los materiales de acuerdo a su conductividad eléctrica:

- a) Conductividad baja. Excelentes condiciones para el trabajo con radar (conductividad menor a 0.0000001 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 0.0000001 a 0.01 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 mayor a 0.01 S/m. Ejemplos: arcilla húmeda, lutita húmeda, agua de mar.

A continuación se presentan algunos valores aproximados de conductividad eléctrica para suelos propuesta por el fabricante del equipo

- ◆ Arcilla saturada: 0.1 a 1.0 S/m.
- ◆ Arcilloso seco: 0.00027 S/m.
- ◆ Arcilloso húmedo: 0.05 S/m.
- ◆ Limo seco: 0.00011 S/m.
- ◆ Limo húmedo: 0.021 S/m.
- ◆ Suelo Arenoso seco: 0.00014 S/m.
- ◆ Suelo Arenoso húmedo: 0.0069 S/m.
- ◆ Arena Seca (SW): 0.0000001 a 0.003 S/m.
- ◆ Arena Saturada (SW): 0.0001 a 0.01 S/m.
- ◆ Aluvión: = 0.001 a 0.01 S/m.

De ello podemos resumir lo siguiente:

a) Los suelos arcillosos pueden tener un rango de conductividad que va de 1.0 S/m para arcilla saturada hasta 0.000027 S/m para arcillas secas, que nos refiere condiciones de excelentes a difíciles para el trabajo con radar, dependiendo de la humedad del suelo.

b) Los suelos limosos pueden tener un rango de conductividad que va de 0.021 S/m para limo húmedo hasta 0.000027 S/m para limo seco, condiciones para el trabajo con radar que van de buenas a excelentes.

c) Los suelos arenosos pueden tener un rango de conductividad que va de 0.01 S/m para arena saturada hasta 0.0000001 S/m para arena seca, condiciones de conductividad de buenas a excelentes.

Se debe observar que las condiciones de humedad en el suelo pueden representar grandes diferencias en la conductividad eléctrica y por tanto, pueden hacer que las condiciones de trabajo varíen de la temporada de lluvia a la de estiaje.

En otro orden de ideas, la permitividad eléctrica 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. Dichos 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.

A continuación se presentan algunos valores aproximados de las constantes dieléctricas para suelos que podrían encontrarse en la Formación Tarango propuestos por el fabricante del equipo

- ◆ Aire: 1.0
- ◆ Arcilla saturada: 8.0 - 12.0
- ◆ Arcilloso seco: 2.4
- ◆ Arcilloso húmedo: 15.0
- ◆ Limo seco: 2.5
- ◆ Limo húmedo: 19
- ◆ Suelo Arenoso seco: 2.6
- ◆ Suelo Arenoso húmedo: 25
- ◆ Arena Seca (SW): 4.0 – 6.0
- ◆ Arena Saturada (SW): 30
- ◆ Aluvión: 10

De ello podemos resumir lo siguiente:

a) Los suelos arcillosos pueden tener un rango en su constante dieléctrica que va de 2.4 para suelo arcilloso seco hasta 15.0 para arcillas húmedas.

b) Los suelos limosos pueden tener un rango en su constante dieléctrica que va de 2.5 limo seco hasta 19 para limo húmedo.

c) Los suelos arenosos pueden tener un rango en su constante dieléctrica que va de 2.6 para suelos arenosos secos hasta 30 para arenas saturadas.

Podemos hacer las siguientes consideraciones: en los trabajos de exploración geofísica en tobas, durante la temporada de lluvia, cuando el suelo está húmedo, el contraste entre el aire ($\epsilon_r = 1.0$) y los limos arenosos ($\epsilon_r = 19.0$) será bueno. Sin embargo la profundidad teórica de exploración estará limitada por la conductividad alta del material (conductividad mayor a 0.01 S/m). Que refiere condiciones difíciles de trabajo con el SIR.

Por otro lado, durante la temporada de estiaje, el contraste entre las tobas secas ($\epsilon_r = 2.5$) y el aire dentro de la mina ($\epsilon_r = 1$) será menor, sin embargo las diferencias en la constante dieléctrica aún serán mayores a 1, lo cual provocará reflexiones en los datos del SIR, aunque de menor magnitud que aquellas que se presentarán cuando el material esté húmedo. Estas condiciones son representativas de una conductividad eléctrica media, es decir representa mejores condiciones de trabajo permitiendo mayores profundidades de exploración, aunque las reflexiones esperadas serán menores.

Cuando una anomalía que pudiera asociarse a una cavidad subterránea es detectada, se emplean métodos semidirectos, en este caso se emplea perforación con un vagón perforador con martillo neumático de punta o broca tricónica.

Los vagones perforadores o Wagondrill, son máquinas que consisten básicamente de una perforadora neumática montada en una guía o mástil de

acero articulado, que es accionado por medios neumáticos e hidráulicos, gira, sube o baja a lo largo del propio mástil, permitiéndole que el número de posiciones para la perforación sea ilimitado.

En la práctica pueden realizar barrenos horizontales, verticales e inclinados, siempre y cuando se encuentren adecuadamente montadas. Las perforadoras son conocidas como de carriles o perforadoras de columna.

Pueden emplear brocas intercambiables de tipo tricónicas o de botones, cuando se emplea martillo neumático de punta, tienen una longitud de avance muy grande. En este caso es de accionamiento de percusión, permitiendo también rotación, es accionada por medio de un compresor que transmite el aire comprimido requerido por medio de mangueras.

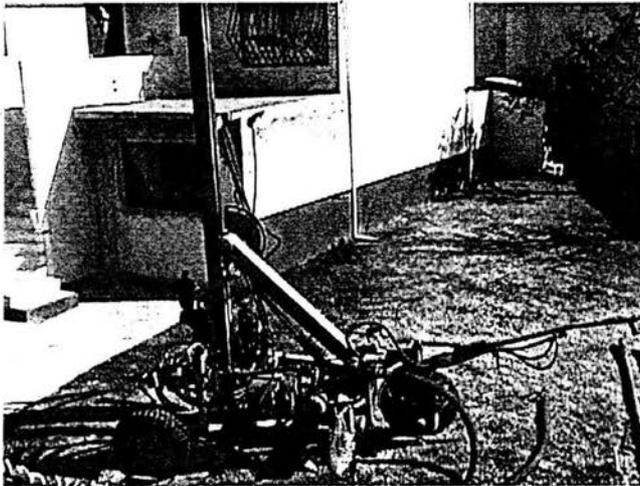


Figura 22.- Vagón perforador.

Los vagones perforadores se emplean fundamentalmente para trabajos de barrenación profunda a diámetros mayores de 3". Son máquinas extremadamente versátiles, gracias a la amplitud de movimientos que les

dispensan los pistones neumáticos que accionan a la articulación del mástil de perforación.

Durante esta etapa los sondeos tienen como único objetivo detectar cavidades, por lo que se realizan sin recuperación de muestras, se emplean brocas tricónicas de 4" de diámetro. Dichos sondeos se ejecutan en los sitios de anomalías, hundimientos, agrietamientos o daños en las estructuras. Su número depende de la geometría y de la ubicación de los rasgos antes mencionados.

Eventualmente se requiere el uso de martillo neumático de punta, para perforar fragmentos de roca dura, como los incluidos en tobas brechoides, aglomerados y depósitos aluviales. La perforación de los sondeos mediante martillo neumático se considera menos apropiada para explorar cavidades que la perforación con equipo rotatorio.

5.2.- ETAPA DE HABILITACION DE CAVIDADES.

La preparación de las cavidades consiste básicamente en dos tipos de actividad:

- 1.- Perforación e instalación de conductos de llenado.
- 2.- Obturación de cámaras.

Para la perforación se emplean los mismos equipos descritos en la etapa anterior, con la salvedad de que en algunos casos el barreno se amplía hasta 8" de diámetro con la finalidad de poder emplear materiales con un tamaño máximo de partícula mayor.

Debido a que frecuentemente se trabaja en zonas habitadas, los espacios libres limitan las operaciones, al grado que en algunos casos es necesario desarmar los equipos de perforación para después montarlos nuevamente en el sitio por perforar. El proceso para el llenado debe ser seleccionado adecuadamente antes de iniciar la habilitación de las cavidades y se debe seleccionar el tipo de suspensión que más rendimiento pueda dar y aquella que favorezca el llenado con una consistencia adecuada.

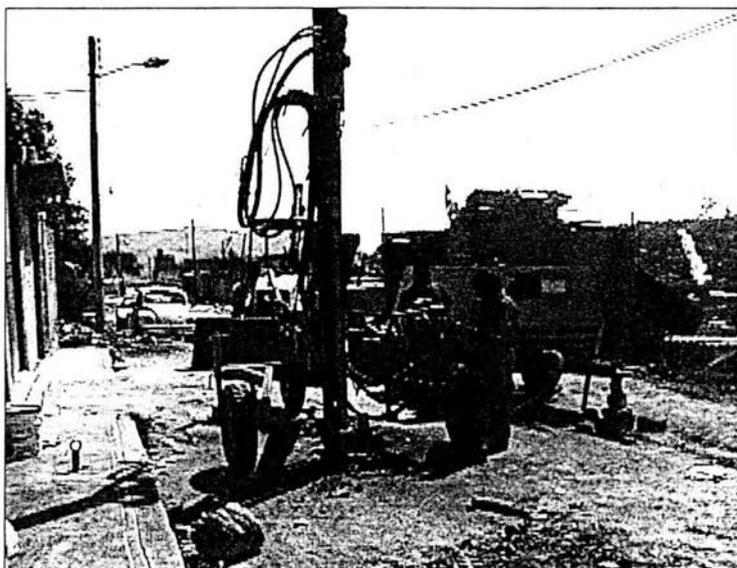


Figura 23.- Proceso de perforación con broca tricónica

Cuando el número de perforaciones posibles es limitado por la existencia de estructuras, el relleno deberá contar con alta fluidez para poder llenar la cavidad y para generar menor resistencia al ser conducido por tubería.

Como se ha mencionado, en Atizapán de Zaragoza se emplean básicamente cuatro tipos de suspensiones para el llenado de las minas. Las proporciones entre los distintos componentes se determinan por volumen aparente:

1.- Lechada de cal de carburo sin aditivos, para efectos del presente trabajo se denominará "suspensión 0".

2.- Mezcla al **10%** de toba por **90%** de lechada de cal de carburo, denominada en este trabajo "suspensión 10".

3.- Mezcla al **25%** de toba por **75%** de lechada de cal de carburo, denominada "suspensión 25".

4.- Mezcla al **40%** de toba por **60%** de lechada de cal de carburo, denominada "suspensión 40".

Las diferencias de dichas mezclas se analizarán en la próxima sección, por lo que en este momento tan solo se menciona que la fluidez, la resistencia a la compresión mínima y el rendimiento de la lechada de cal de carburo son aquellos factores que más se deben cuidar. El suministro de cal de carburo depende de la producción de acetileno, por lo que está limitado y debe aprovecharse al máximo, por lo cual las "suspensiones 25 y 40" son las que mayor rendimiento ofrecen.

De cualquier forma, aunque se cuente con un importante número de lugares disponibles para perforar, el proceso de llenado no siempre es posible al pie del barreno. Las pendientes del terreno no siempre permiten el acceso de los equipos de llenado. En cualquiera de estos casos es necesario instalar tuberías para transportar la mezcla.



Figura 24.- Soldadura de tubería de polietileno de alta densidad con equipo de termofusión.

El llenado puede realizarse, en el mejor de los casos, a gravedad a pie de barreno, con bomba de cavidad progresiva ó con bomba de concreto. Para ello se emplean distintas tuberías entre las cuales destaca la de polietileno de alta densidad cuyas ventajas son las siguientes: bajo peso, se puede soldar con facilidad por medio de termofusión y gran versatilidad ya que puede cortarse y soldarse nuevamente al tamaño requerido.

Una vez definido el proceso de llenado, es frecuente que sea necesario obturar los socavones con la finalidad de aislarlos para su llenado, lo mismo sucede con las bocas de mina donde se instalan obturaciones a base de costales llenos de toba, con la finalidad de que la suspensión no escape.

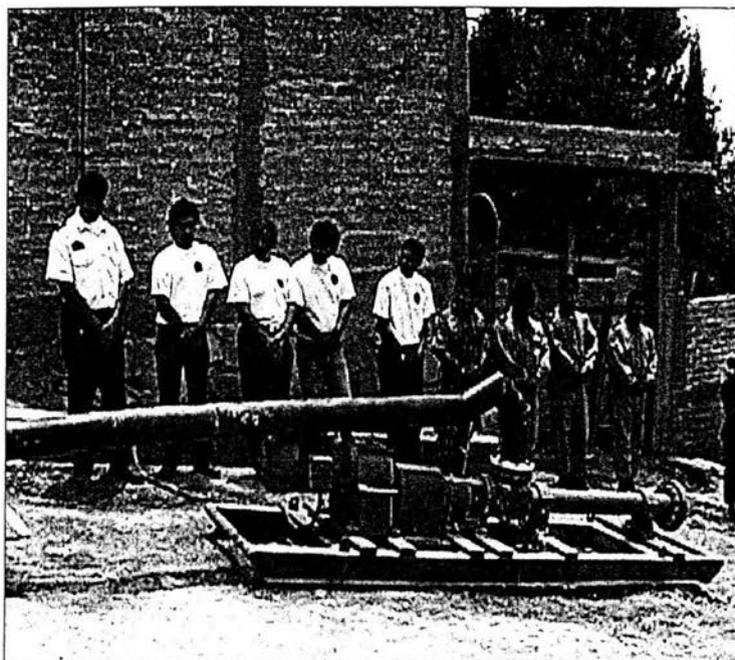


Figura 25.- Bomba de cavidad progresiva.

5.3.- RELLENO DE CAVIDADES Y PROPIEDADES INHERENTES A LAS MEZCLAS TOBA-CAL DE CARBURO.

Al dejar una suspensión toba - cal de carburo en reposo, por efecto de la fuerza de gravedad se sedimentan las partículas. La decantación se puede describir como la formación de una capa de agua por encima de una lechada o suspensión recién depositada, causada por sedimentación de las partículas sólidas y la simultánea migración del agua hacia arriba.

Lo anterior ocasiona que al inyectar un volumen determinado de suspensión, el sólido final llegue a ser, en algunos casos, cercano al 50% del volumen depositado en la mina. El sólido final producido por la suspensión 0 y 10 es un ejemplo de lo antes mencionado, para la suspensión 25 el volumen de

sólido final oscila en 90% del volumen inyectado y para la suspensión 40 el sólido alcanza hasta el 95% de sólido final.

El tiempo de sedimentación inicial observado oscila de 2 a 3 horas para las suspensiones 0 y 10, para la suspensión 25 el tiempo es aproximadamente de 6 horas y en el caso de la suspensión 40 llega a ser de hasta 14 horas. Sin embargo, el proceso de contracción por deshidratación es más lento llegando incluso a durar hasta 6 meses. Por tanto, el volumen final dependerá de dos procesos, el primero de sedimentación y el segundo, más lento, de contracción por secado.

Un fenómeno ligado estrechamente al tamaño de las partículas de cal de carburo y de toba es el exprimido de la mezcla al pasar entre las paredes de la mina tratada, a través de los poros del suelo o de las grietas.

En el caso de la suspensión 0, se conjuntan dos factores que favorecen el fenómeno de exprimido; en primer lugar está la alta porosidad de los estratos de arenas pómez donde se ubican las minas y por otro lado el tamaño de partícula extremadamente pequeño de la cal de carburo.

Al ponerse en contacto la solución con las paredes de la mina, el agua de exceso tiende a filtrarse por los poros y las fisuras, registrándose un fenómeno de exprimido inicial en la solución. Desde luego, hay que pensar que por las grietas y por los poros del material se puede generar un flujo de lechada, la cual avanzará hasta que el tamaño de los poros o las grietas lo permita. Hay que aclarar que los materiales granulares de pómez están compuestos de vidrio volcánico y por tanto pueden reaccionar puzolánicamente con la suspensión que llegue a entrar en contacto con ellos, con la consecuente formación de silicatos y aluminatos de calcio hidratados en una aureola en torno a la cavidad.

El hidróxido de calcio restante dentro de la mina, después del proceso de deshidratación precipita formando cristales de portlandita y presenta un comportamiento plástico, alcanzando una resistencia a la compresión simple de hasta 5 kg/cm^2 . Posteriormente las aguas subterráneas infiltradas con CO_2 disuelto reaccionan con el hidróxido de calcio para formar carbonato de calcio. También los sulfatos del suelo comienzan a reaccionar con la cal formando sulfato de calcio (yeso), ambos fenómenos sirven para aumentar la resistencia a la compresión simple del relleno. Dado que los procesos de carbonatación y formación de yeso en el relleno son más lentos, para la suspensión 0 se asume una resistencia a la compresión simple, inicial de tan solo 5 kg/cm^2 la cual sobrepasa las presiones de tierras que resultan de los análisis del punto 4.3 de este mismo documento, con lo que se puede asumir un factor de seguridad aproximadamente igual a 2. No obstante lo anterior y a pesar de que el factor de seguridad es adecuado para esta suspensión, la eficiencia es mas baja, con sólidos finales del orden del 50% del material depositado.

Por otro lado, en las suspensiones de mezclas entre tobas con cal de carburo, las reacciones puzolánicas se presentan con la consecuente precipitación de aluminatos y silicatos de calcio hidratados que aumentan la resistencia a la compresión simple del relleno. Ciertamente la formación de S-C-H no ocurre instantáneamente habiendo un volumen mínimo de agua que la mezcla necesita para la reacción puzolánica.

La aplicación de tobas aumenta la resistencia a la compresión simple del relleno y corrige algunas de las desventajas que presenta la suspensión 0. En primer lugar reducen el volumen de agua libre al adicionar arcillas de tipo montmorillonitas, que mantienen a las demás partículas de la mezcla en suspensión durante el tiempo suficiente para que se inicie el fraguado, con ello el volumen de sólidos final aumenta.

Las arcillas de la toba empleada alargan el tiempo de exprimido de la mezcla una vez depositada en la mina. En otras palabras, retienen a las

partículas de agua, induciendo en la mezcla atracciones fisicoquímicas. Además, tienden a homogeneizar la suspensión haciendo más regular la fluidez de la misma.

Otro aspecto básico de los rellenos empleados es el control de la fluidez o velocidad de escurrimiento. Para obtener suspensiones con velocidades de escurrimiento altas, hay que adoptar relaciones lechada de cal de carburo / toba muy elevadas. Como se ha dicho, lo anterior ocasiona que al depositar un volumen determinado de suspensión el volumen de sólido final sea muy bajo. La viscosidad de las suspensiones es un factor característico que determina la aplicación correcta de una mezcla determinada en un caso específico. Si se trata de inyectar zonas minadas extensas a través de un número limitado de barrenos disponibles, es obvio que una suspensión 0 o 10 con baja viscosidad es la adecuada.

Resulta evidente que al hablar de rangos de aplicación de las suspensiones 0, 10, 25 y 40, hay que pensar en materiales de alta fluidez, fluidos, de baja fluidez y viscosos. Cada tipo de suspensión puede tener un campo de aplicación en particular, que depende de las condiciones encontradas sobre la mina a tratar: zonas habitadas, espacios libres, pendientes superficiales, etc. Con ello se confirma que el proceso para el llenado debe ser seleccionado adecuadamente, se debe considerar el tipo de suspensión que más rendimiento nos de y aquel que favorezca el llenado con una fluidez suficiente.

Las propiedades de la suspensión seleccionada deben ser acordes con el equipo de colocación. Si se emplea bomba de cavidad progresiva las partículas deben ser finas y las mezclas de baja viscosidad, el equipo disponible es una bomba de cuatro pasos con un diámetro de 4", dicho equipo permite el uso de materiales con un tamaño máximo de partícula de un centímetro, por tal motivo, en este caso el material es previamente cribado, para lo cual se emplea una banda transportadora y una criba vibratoria accionada con motores eléctricos.

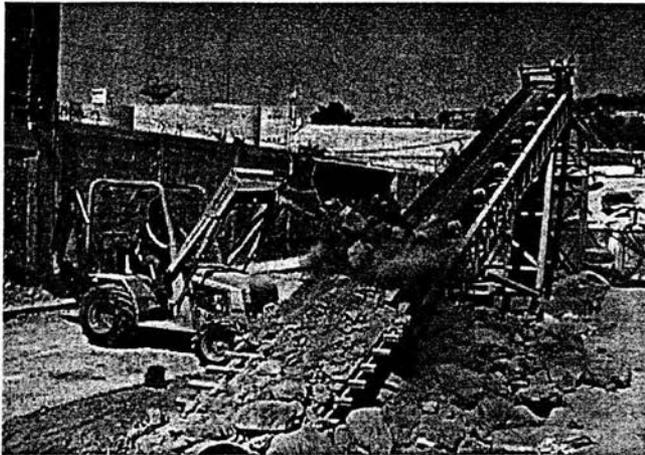


Figura 26.- Equipo empleado para el cribado de las tobas.

El procedimiento más simple es aquel en el que se deposita la suspensión seleccionada a gravedad y a pie de barreno. Previamente se ejecuta un barreno que se amplía con broca tricónica hasta un diámetro de 8". En este caso se debe cuidar principalmente la distancia hasta donde se pretende hacer el llenado, seleccionando la suspensión adecuada. Como se ha mencionado, en algunos casos el espacio disponible para barrenar está limitado y por tanto la cavidad debe llenarse por un número reducido de barrenos. En dichos casos el relleno debe recorrer distancias considerables dentro de la mina por lo que la suspensión debe contar con la fluidez necesaria para lograr dicho cometido.

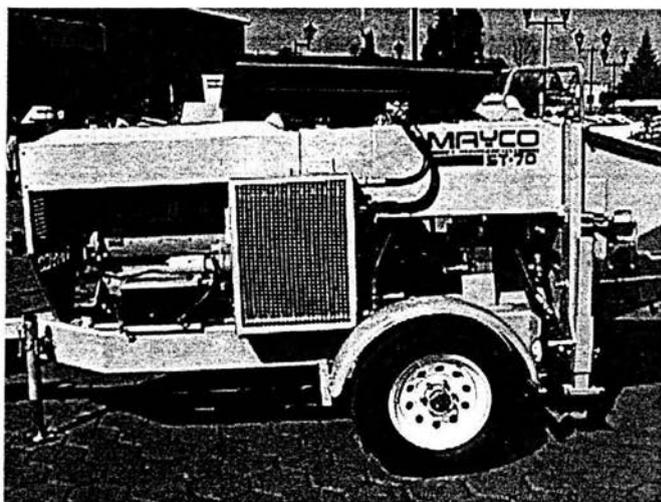


Figura 27.- Bomba para concreto.

Cuando la distancia es muy grande y las condiciones de estabilidad de la mina así lo permiten, se instala una línea de tubería de polietileno de alta densidad de 4" para transportar suspensiones 25 ó 40, hasta las cámaras previamente obturadas, en estos casos es posible emplear una bomba de cavidad progresiva o una bomba de concreto. Cuando las condiciones de acceso de la mina están limitadas o representan un alto riesgo para el personal no se instala la línea de polietileno, se deposita la suspensión a gravedad y se emplean suspensiones 0 o 10, para garantizar que el material fluya adecuadamente, con las consecuentes reducciones en la eficiencia del sólido final obtenido.

En esta etapa se requiere extremar los cuidados al seleccionar la suspensión, ya que su alto volumen de consumo repercute en forma directa en el aprovechamiento de la cal de carburo, cuya producción es limitada por las razones antes analizadas, lo cual repercute en forma directa en el costo global de la rehabilitación del terreno.

Un efecto importante del relleno es el confinamiento que procura a las paredes y pilares entre los salones, aumentando con ello su capacidad portante, sin embargo, esta operación no es suficiente para recibir las bóvedas, ya que es común que el relleno se contraiga. La última etapa en el proceso de se lleva a cabo una vez que el relleno haya fraguado o experimentado la contracción inherente a este proceso. Se emplean entonces lechadas estables de gran fluidez como la suspensión 10, colocadas a presiones que no excedan apreciablemente las debidas al peso propio del terreno.

Como se ha podido apreciar, esta forma de tratamiento de terrenos afectados por cavidades subterráneas consiste en llenar ordenadamente las cavidades, empleando los materiales más económicamente disponibles en el lugar, con la resistencia adecuada. Su objetivo es reponer a la masa de suelo la continuidad para compensar los efectos de la excavación de las galerías.

Es de esperarse que el relleno con suspensiones a partir de cal de carburo y tobas volcánicas además de llenar toda la cavidad, generará cambios químicos en los materiales pumíticos que conforman las paredes, reaccionando con las fases puzolánicas de la masa de suelos y precipitando silicatos de calcio hidratados. Finalmente es de esperarse que el relleno será capaz de tomar los esfuerzos producidos por la masa de suelo al entrar en contacto con la mina. La formación en la suspensión de carbonatos de calcio, sulfatos de calcio, aluminatos y silicatos de calcio hidratados, sirven para la obtención de la resistencia necesaria en tal fin.

CONCLUSIONES.

Como se ha podido apreciar a lo largo del presente trabajo, la zona de lomas del poniente del Valle de México está afectada por cavidades subterráneas de origen artificial, resultado de explotaciones mineras realizadas sin un control en el pasado.

En 1998 el Ayuntamiento de Atizapán de Zaragoza implementó el Programa Municipal de Reducción de Riesgos en Zonas Minadas, con la finalidad de cambiar la situación en que vive un gran número de ciudadanos afectados por este problema. Para tal efecto, se consideró que si se emplearan los métodos tradicionales la empresa representaría una inversión imposible de cubrir.

Por tal motivo, se desarrollaron nuevos materiales y un procedimiento que emplea suelos del lugar e hidróxido de calcio, con miras a utilizarlos económicamente en el relleno de cavidades. Por lo que, para implementar una solución al alcance de las posibilidades de un municipio como Atizapán, fue necesario estudiar a fondo ésta alternativa.

La hipótesis inicial del trabajo fue la siguiente: "Al mezclarse el hidróxido de calcio de la cal de carburo con algunas de las fases presentes en las tobas provenientes de los depósitos de la Sierra de las Cruces, precipitan silicatos de calcio hidratados, aluminatos de calcio hidratados, carbonatos de calcio, sulfatos de calcio así como cristales de hidróxido de calcio, que generan las propiedades necesarias para ser empleados en la reducción de riesgos por subsidencia y colapso en las zonas minadas del poniente del Valle de México".

Después de presentar los resultados de las pruebas de difracción de rayos X de polvos, realizadas a una muestra de toba proveniente del municipio

de Atizapán de Zaragoza, se pudo encontrar que los depósitos de la Formación Tarango, presentan fases con las características necesarias para ser empleados económicamente en la producción de mezclas puzolánicas, para la reducción de riesgos por subsidencia y colapso en zonas minadas. De las dos tobas analizadas, la proveniente del Cerro de Calacoaya fue la que mostró menos fases con propiedades puzolánicas, en la toba de la Viznaga se encontró, aunque en poca cantidad heulandita, lo cual hacía suponer que el resultado final al mezclarse con el hidróxido de calcio sería mejor.

Se profundizó en dos de las fases minerales de las tobas, las zeolitas y las arcillas. En los resultados de difracción de rayos X de las mezclas se pudo observar que las montmorillonitas no se encontraron después de 7 días de reacción, en cambio sí se encontraron cloritas de calcio hidratadas, sin embargo también, se pudo observar que los silicatos de calcio hidratados no se encontraron entre las fases de las mezclas. Ello se puede atribuir al hecho de que las fases amorfas reaccionan a menor velocidad y a que las tobas no fueron molidas antes de su mezclado. Es de suponer que los silicatos de calcio hidratados comenzarán a aparecer cuando la mezcla adquiera mayor edad, sin embargo, es recomendable realizar mas pruebas de DRX a mezclas de mayores edades.

Se analizó el posible mecanismo de falla de las minas, y se encontró que el factor más importante está asociado a los cambios que la excavación induce en las condiciones hidráulicas de la masa de suelo. El criterio de Terzaghi fue aplicado para estimar la presión de tierras, empleando las propiedades índice y mecánicas de algunos sitios minados ubicados en Atizapán de Zaragoza, con lo que se pudo encontrar que las sollicitaciones inducidas por la masa de suelo están en un rango que hace adecuada la mezcla toba - cal de carburo, para tales fines.

Es un hecho que los estudios sobre las propiedades puzolánicas de los depósitos de tobas deberán aumentar, sobre todo si consideramos que en un

futuro, no muy lejano, los cementos Portland mezclados con puzolanas naturales serán cada vez más comunes, no debemos, ni podemos, mantenernos al margen de esta realidad.

BIBLIOGRAFIA.

- 1.- Portilla C. Pedro. Portilla D. Margarita. "Materiales de Construcción Empleados en la Antigüedad y Similitud con los Empleados en la Actualidad". División de Ciencias Básicas. Facultad de Química. U.N.A.M México. D.F. 1986.
- 2.- Rodríguez Camacho Rosa Elva, et. al, "Los cementos puzolánicos aumentan la resistencia del concreto al ataque de sulfatos", en Revista Construcción y Tecnología, Instituto Mexicano del Cemento y el Concreto, Julio de 2000.
- 3.- Frederick A. Mumpton, "La Roca Mágica: Uses of Natural Zeolites in Agriculture and Industry", Paper Presented at National Academy of Sciences colloquium "Geology, Mineralogy, and human Welfare", November 9, 1998.
- 4.- Palacios Maldonado Adrián Héctor, "Reactividad de Puzolánas Naturales". Tesis. UNAM. 1989.
- 5.- K.P. Kitsopoulos y A.C. Dunham, "Heulandite and mordenite – rich tuff from Greece: a potential source for pozzolanic materials" Geology Department, Leicester University, 1996.
- 6.-Janotka Ivan y Stevula Ladislav, "Effect of Bentonite and Zeolite on Durability of Cement Suspension under Sulfate Attack", en ACI Materials Journal, Noviembre-Diciembre 1998.
- 7.- Costa U. And Massazza, F.,in "Effects of flayash incorporation in cement and concret" (ed. S. Diamond), p. 134, Material Research Society, University Park, PA (1981).
- 8.- Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, Simposio sobre Cimentaciones en Zonas Minada en la Ciudad de México, México, 1976.
- 9.- Romero Estrada Alma Silvia, "El Agua Subterránea y su Impacto en las Zonas Minadas de la Delegación Alvaro Obregon". Tesis. UNAM. 1997.
- 10.- McKinstry Hugh Exton, "Geología de Minas". Ed. Omega. Barcelona. 1961,
- 11.- Rico Rodríguez Alfonso, "La Ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres, Volumen II". Ed. Limusa. México. 1996.
- 12.- Steven H. Kosmatka, "Lechadas Cementantes e Inyección de Lechada", Ed. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto. México. 1999.