

2ej



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

ESTABILIDAD DE UN CORTE REALIZADO EN EL CERRO TLAYACAMPA, UBICADO EN LA SIERRA DE GUADALUPE.

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO GEOLOGO
PRESENTAN:
SAUL HERNANDEZ SANTANA
SILVESTRE CARLOS RODRIGUEZ DIAZ



CIUDAD UNIVERSITARIA, MEXICO, D.F.

MARZO, 1999

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

271513



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

SR. SAUL HERNANDEZ SANTANA
Presente

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-I-013

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor Ing. Reginaldo José Hernández Romero y que aprobó esta Dirección para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de Ingeniero Geólogo :

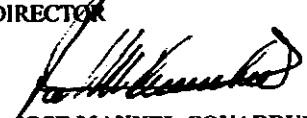
ESTABILIDAD DE UN CORTE REALIZADO EN EL CERRO TLAYACAMPA, UBICADO EN LA SIERRA DE GUADALUPE

	RESUMEN
	INTRODUCCION
I	ANTECEDENTES
II	GENERALIDADES
III	GEOLOGIA GENERAL
IV	TRABAJOS PREVIOS
V	CONCEPTOS BASICOS SOBRE ESTABILIDAD DE TALUDES
VI	RESULTADOS
	CONCLUSIONES
	RECOMENDACIONES
	BIBLIOGRAFIA Y REFERENCIAS

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

Asimismo, le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que se deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar examen profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Ciudad Universitaria, a 12 de mayo de 1998
EL DIRECTOR


ING. JOSE MANUEL COVARRUBIAS SOLIS
JMCS*RELR*gtg



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-1-012

SR. SILVESTRE CARLOS RODRIGUEZ DIAZ
Presente

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor Ing. Reginaldo José Hernández Romero y que aprobó esta Dirección para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de Ingeniero Geólogo :


ESTABILIDAD DE UN CORTE REALIZADO EN EL CERRO TLAYACAMPA, UBICADO EN LA SIERRA DE GUADALUPE

	RESUMEN
	INTRODUCCION
I	ANTECEDENTES
II	GENERALIDADES
III	GEOLOGIA GENERAL
IV	TRABAJOS PREVIOS
V	CONCEPTOS BASICOS SOBRE ESTABILIDAD DE TALUDES
VI	RESULTADOS
	CONCLUSIONES
	RECOMENDACIONES
	BIBLIOGRAFIA Y REFERENCIAS

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

Asimismo, le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que se deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar examen profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Ciudad Universitaria, a 12 de mayo de 1998
EL DIRECTOR


ING. JOSE MANUEL COVARRUBIAS SOLIS
JMCS*REL*LR*gig

CONTENIDO

RESUMEN.....	i
INTRODUCCION.....	iii
I ANTECEDENTES.....	1
I.1 Area de estudio.....	3
I.2 Problemática.....	3
II GENERALIDADES.....	5
II.1 Localización	5
II.2 Vías de comunicación.....	5
II.3 Clima y vegetación.....	5
II.4 Hidrología.....	9
II.5 Aspectos sociales y vialidad.....	9
II.6 Tipo de construcciones	13
III GEOLOGIA GENERAL.....	15
III.1 Marco geológico regional de la Cuenca de México.....	15
III.2 Tectónica.....	18
III.3 Morfología y fisiografía	20
III.4 Estratigrafía.....	22
III.5 Geohidrología	24
III.6 Geología de la Sierra de Guadalupe.....	25
III.7 Geología Estructural de la Sierra de Guadalupe.....	28
III.8 Geología Histórica de la Sierra de Guadalupe.....	30

IV TRABAJOS PREVIOS.....	32
IV.1 Estudio Geológico Local	32
IV.1.1 Geología Estructural.....	37
IV.2 Estudio Geofísico.....	44
IV.2.1 Análisis de la información	47
IV.2.2 Resultados del estudio geofísico.....	50
IV.3 Estudio Minero	52
IV.3.1 Métodos para la detección de cavidades en zonas minadas	52
IV.3.2 Levantamiento de túneles de minas antiguas.....	54
V CONCEPTOS BASICOS SOBRE ESTABILIDAD DE TALUDES.....	60
V.1 Definición de talud	60
V.2 Clasificación de los taludes	60
V.2.1 Taludes Naturales	61
V.2.2 Taludes Artificiales	61
V.3 Definición de estabilidad e inestabilidad de taludes.....	62
V.4 Factores importantes de análisis en la estabilidad de taludes.....	63
V.4.1 Diseño de taludes.....	63
V.4.2 Estudio de la estabilidad de taludes existentes.....	64
V.5 Antecedentes históricos de los métodos de análisis de estabilidad de taludes.....	64
V.5.1 Propósito de los cálculos de estabilidad	65
V.5.2 Comentarios acerca de los métodos de cálculo	66
V.5.3 Método de las dovelas.....	67
V.6 Definición de factor de seguridad	70
V.7 Causas que producen movimientos de las masas de tierra	71
V.8 El concepto de falla.....	72
V.8.1 Fallas en Taludes Naturales.....	73
V.8.1.1 Creep.....	73
V.8.1.2 Flujos.....	76

V.8.2 Fallas en Taludes Artificiales	81
V.8.2.1 Falla Rotacional.....	81
V.8.2.2 Falla Traslacional	86
V.8.2.3 Falla con superficie compuesta.....	87
V.8.2.4 Fallas Múltiples.....	87
VI RESULTADOS.	90
VI.1 Aplicación del Método de las Dovelas en el talud denominado "El Cantil" e interpretación de los resultados	92
CONCLUSIONES.	140
RECOMENDACIONES.	142
BIBLIOGRAFIA Y REFERENCIAS.	143

RESUMEN

Entre los graves problemas que aquejan a la sociedad; esta la sobrepoblación y la expansión de la mancha urbana que se extiende hacia cualquier lugar; por inaccesible o inhabitable que parezca con todo y los inconvenientes que esto acarrea.

Tal es el caso de los habitantes de la Colonia San Rafael- Los Parajes; los cuales se asentaron en el Cerro Tlayacampa; ubicado en el Municipio de Tlalnepantla de Baz, Estado de México, ignorando el riesgo que corrían al establecerse sobre un gran desarrollo de zonas minadas subterráneas abandonadas.

No obstante lo anterior, la actividad antrópica desarrollada en el talud y zonas aledañas; debida a la inducción negativa directa o indirecta que tuvieron los habitantes sobre el entorno geológico-ambiental que los rodeaba (modificando las condiciones naturales originales que prevalecían en el talud, antes de verse poblado), *activó, aceleró y acrecentó* el riesgo de los asentamientos humanos en dicha colonia.

Los problemas que actualmente presenta la zona de estudio (conocida localmente como "El Cantil") son: 1.- Presencia de un gran desarrollo minero subterráneo abandonado bajo gran parte de la Colonia. 2.- Una secuencia de depósitos vulcanoclásticos heterogéneos poco consolidados, destacando entre ellos la presencia de capas arcillosas y tobas alteradas. 3.- Existencia de una superficie potencial de falla que aflora en la corona del talud (afectando gravemente la cimentación de algunas viviendas) la cual corre por el cuerpo del mismo hasta el techo de una mina localizada en la Unidad Litológica Tres (U₃). 4.- Desarrollo de taludes casi verticales; debidos a la sobreexplotación a cielo abierto de los materiales pétreos que se llevó a cabo sin control ni planeación alguna. 5.- Sobrepoblación en la Colonia. 6.- Sobrecarga en la corona del talud, generado por la circulación de trailers y otros vehículos pesados sobre ella, así como por la construcción de viviendas con más de dos niveles y 7.- Presencia de topes vehiculares en la corona del talud, los cuales provocan vibraciones por el impacto que se genera cuando los vehículos lo libran.

Con base en lo anterior, se analizó detalladamente el comportamiento mecánico que adquiere el talud (en condiciones secas), bajo un método de cálculo como lo es el Método Sueco o Método de las Dovelas cuando influyen los factores de riesgo ya mencionados, (puntos 1 a 7).

De la aplicación del Método de las Dovelas los resultados que se obtuvieron; muestran que los valores del Factor de Seguridad obtenidos son mayores a 1.5 (valor de un Factor de Seguridad base), por lo que establecemos con ello y con el apoyo de los trabajos previos realizados en la zona, que el talud es *estable*; aún con los problemas que presenta, aunque habrá que tomar en cuenta que esta condición de estabilidad puede verse afectada cuando el talud presente condiciones de humedad.

Finalmente, se concluyó: colocar material de relleno desde la corona y hasta el pie del talud con una pendiente de 45° aproximadamente con el que se pretende contrarrestar las fuerzas actuantes que podrían provocar el deslizamiento parcial del talud, disponer en la ladera artificial del talud de una cubierta vegetal para disminuir la acción del intemperismo y la erosión, regenerar en la medida de lo posible la totalidad de la mina, eliminar los topes vehiculares, limitar el tránsito de vehículos pesados en la corona del talud y restringir la construcción de más viviendas.

INTRODUCCION

Hasta hace relativamente pocos años, el diseño y análisis de los taludes se manejó con normas puramente empíricas, sin embargo; debido a la necesidad de mantener bajos los costos y los riesgos que vienen implícitos en la estabilidad de un talud, fue necesario conjuntar esfuerzos y aplicar al diseño de éstos; normas y criterios reales que sistemáticamente tomaran en cuenta propiedades mecánicas, hidráulicas y características geológicas del talud, obteniendo paulatinamente mejores resultados, mayor experiencia y nuevas ideas teóricas que permitieran conocer mejor el funcionamiento particular de estas estructuras.

En la actualidad, el moderno desarrollo de las vías de comunicación; ha colocado en un plano de importancia ingenieril de primer orden *al diseño, la construcción y la estabilización de taludes*, tanto por el aspecto de inversión como por el de consecuencias derivadas de su falla.

Las áreas del conocimiento ligadas a la estabilidad de taludes son: la Mecánica de Suelos, la Mecánica de Rocas y la Geología Aplicada. Esta última resulta ser indispensable y necesaria en la formulación y avalación de los criterios y las medidas preventivas más aceptables en la solución del problema.

En nuestro caso particular; el adecuar y aplicar esta tecnología referente a la estabilidad de taludes; a los graves problemas que acarrear los asentamientos humanos en zonas de alto riesgo; en una urbe como lo es la Ciudad de México, nos obliga a plantear alternativas y soluciones en un campo que pareciese por más; ajeno al urbanismo.

La Ciudad de México con más de 8 millones de habitantes y con un crecimiento de la mancha urbana que pareciese consumir cualquier espacio físico disponible a habitarse, ha dispuesto de espacios para vivir en zonas con un alto riesgo de inseguridad en la estabilidad del suelo, como es el caso del talud; ubicado en la zona conurbada localmente conocida como " El Cantil ", el cual presenta principalmente los siguientes problemas: severos agrietamientos en la corona, fracturas en el cuerpo del talud, antiguas minas abandonadas y excavación de material al pie del talud.

Todo esto trae consigo un grave problema de inestabilidad del talud, lo que nos lleva a plantear como objetivo de esta tesis; analizar mediante el Método de las Dovelas la relación que guarda el comportamiento mecánico del talud con las minas abandonadas, la excavación del material al pie del mismo, la sobrecarga y las vibraciones que en él se generan por la actividad humana de los colonos de San Rafael-Los Parajes , en el Municipio de Tlalnepantla de Baz, Estado de México.

I ANTECEDENTES

Son diversos los problemas que afectan a la Ciudad de México (denominada la ciudad más grande del mundo, con 8.5 millones de habitantes -INEGI 1995-).

Algunos de éstos son los siguientes:

- El crecimiento desmedido de la población .
- La expansión de la mancha urbana a sitios inadecuados.
- La imperiosa necesidad de satisfacer las necesidades básicas primarias.
- La falta de una buena planeación habitacional.
- El escaso o nulo apoyo económico (privado y/o gubernamental) para la buena aplicación tecnológica que repercuta en resultados reales en la solución de diversos problemas que afectan a la sociedad y
- El tipo de suelo sobre el cual está edificada la Ciudad de México.

Tal situación propicia que se generen de alguna manera la presencia de desastres en los cuales la actividad humana aceleró el desarrollo de algunos procesos geológicos.

Algunos riesgos geológicos, y sus procesos condicionantes son mostrados en la **Tabla No.1.**

La adición de los fenómenos antrópicos a los fenómenos que ocurren de manera natural y espontánea, como parte de los diversos procesos de la dinámica terrestre, tal como los eventos sísmicos y volcánicos debidos al movimiento de placas tectónicas (Geodinámica interna), o bien los procesos erosivos que actúan sobre la superficie del planeta (Geodinámica externa), nos lleva a conceptualizar el problema de la inestabilidad de suelos de manera multi e interdisciplinaria.

En **la Tabla 2** se muestra la relación entre algunos eventos geológicos y las ciencias que se encargan de ellos.

Tabla 1. Clasificación de los riesgos geológicos debidos a los procesos condicionantes (Lozano, C., 1997).

TIPO DE RIESGO	PROCESOS QUE LO CONDICIONAN	FENOMENOS PELIGROSOS
NATURAL	Geodinámica Interna Geodinámica Externa	Sismicidad Fallamiento Deformación de la corteza Vulcanismo Deslizamiento de tierras Erosión Sedimentación
ANTROPICOS	Actividad humana, la cual activa y condiciona el desarrollo de procesos geológicos, los cuales no se manifestarían sin su ayuda.	Fracturamiento Subsidencia Agrietamiento Contaminación de acuíferos Contaminación de suelos Inestabilidad de taludes
MIXTOS	Actividad humana en conjunto con procesos geológicos en desarrollo, los cuales se ven aumentados en magnitud por dicha ayuda.	Inestabilidad de taludes Inestabilidad de laderas Inundaciones Desertificación Erosión

Tabla 2. Relación existente entre algunos eventos geológicos potencialmente peligrosos y las diversas ramas de la ciencia encargadas de su estudio. (Lozano, C., 1997).

EVENTO GEOLOGICO	RAMA DE LA GEOLOGIA QUE ESTUDIA EL FENOMENO CAUSANTE
Fallamiento Fracturamiento	Geología estructural
Deslizamiento de tierras Erosión	Geomorfología
Intemperismo y alteraciones químico-mineralógicas	Geodinámica externa
Sismicidad Erupciones y fenómenos volcánicos	Geofísica Vulcanología
Contaminación de acuíferos Sobreexplotación de acuíferos Contaminación de suelos Inestabilidad de taludes	Geohidrología Edafología Geotecnia

1.1 AREA DE ESTUDIO

El área de estudio de este trabajo comprende a la localidad conocida como "El Cantil", que pertenece al Cerro Tlayacampa, esto es al Suroeste de la Sierra de Guadalupe. En el Municipio de Tlalnepantla de Baz. Estado de México. (Fig. 1.1).

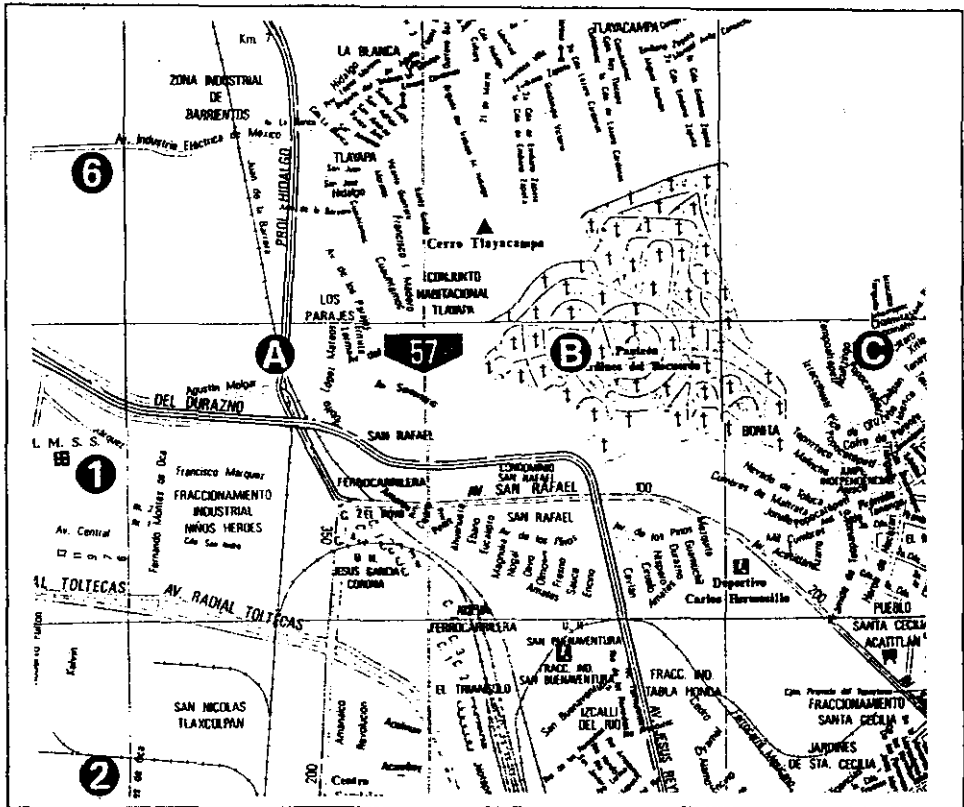


Fig.1.1 Area de estudio.

1.2 PROBLEMÁTICA

En el Municipio de Tlalnepantla de Baz, durante los años 80's, se habían venido presentando diversos problemas de desestabilización provocados por sobrepoblación, por sobrepeso en el cuerpo del talud y por algunos factores antrópicos ya presentes en el terreno (zonas minadas).

La sobrepoblación de la zona aunada a la falta de conciencia o de conocimientos de los habitantes; ha provocado desajustes en la estabilidad del talud, el cual hasta hace algunos años había sido explotado como banco de materiales; para la industria de la construcción.

En octubre de 1995 se manifestó la presencia de grietas sobre el pavimento (corona del talud) así como en algunas casas ubicadas en las calles Seminario, Continuación de Seminario y Morelos que colindan con el talud de la zona de explotación de materiales pétreos mejor conocida como " El Cantil ", al Sureste de las Colonias San Rafael- Los Parajes.

En primera instancia se ordenó la colocación de testigos de yeso en la mayoría de las fracturas que se encontraron en las casas-habitación, pidiendo la colaboración de los moradores de las mismas; para que se dedicaran a observar detenidamente día con día si los testigos manifestaban algún movimiento por pequeño que este fuera, haciendo hincapié en que reportaran cualquier anomalía por pequeña o insignificante que les pareciera; pues con ello se evitarían desgracias materiales y personales de consideración.

Afortunadamente desde esa fecha las fracturas de las construcciones no sufrieron movimientos, sin embargo; en la Calle Seminario sobre el asfalto y la banquetta continuaba la separación y aparición de nuevas fracturas, pudiéndose relacionar con la existencia de antiguos túneles abandonados que fueron usados durante la explotación minera subterránea de los materiales arenosos constitutivos del talud.

II GENERALIDADES

II.1 LOCALIZACION

El área de estudio, es el talud conocido localmente como "El Cantil", el cual se ubica al Suroeste del Cerro Tlayacampa; esto al Poniente de la Sierra de Guadalupe.

Los límites de la Sierra de Guadalupe están localizados en los paralelos $19^{\circ} 29' 30''$ y $19^{\circ} 37' 30''$ de latitud Norte y los meridianos $99^{\circ} 02' 30''$ y $99^{\circ} 12' 30''$ de longitud Oeste. (*Fig. II.1*).

Por su parte, el talud "El Cantil" está ubicado entre las Calles Seminario, Continuación de Seminario y Morelos al Sureste de las Colonias San Rafael-Los Parajes, en el municipio de Tlalnepantla de Baz, Estado. de México (*Fig. II.2*), colindando al Este con el Panteón Jardines del Recuerdo (*Fig. II.3*).

II.2 VIAS DE COMUNICACION

Es posible llegar a esta zona desde el Distrito Federal a través de la autopista federal No. 85 México-Pachuca y la autopista federal No. 57 México-Querétaro; que bordean a la Sierra por el flanco Oriente y Occidente respectivamente. Por el Norte, ambas vías están comunicadas por la carretera estatal que une a San Cristobal Ecatepec con Tlalnepantla, esto es; de Oriente a Poniente.

También pueden comunicarse ambas carreteras por el lado Sur, mediante la carretera que parte de Indios Verdes, que pasa por Ticomán; Cuauhtepc Barrio alto y Cuauhtepc Barrio bajo la cual llega a Tlalnepantla. De hecho se establece una comunicación en torno a la Sierra de Guadalupe; que implica grandes ventajas en lo que a vías de comunicación se refiere.

II.3 CLIMA Y VEGETACION

La temperatura media anual en la zona es de 17° C. El clima predominante es semiárido, seco y en consecuencia los suelos de las partes bajas son salinos, pues la humedad es insignificante todo el año, la evaporación intensa arrastra las sales contenidas en las corrientes subterráneas hacia la superficie. En estas condiciones la flora; de acuerdo con la división de la Cuenca de México en seis estaciones biológicas comprende a la tipo de regiones palustres y pedregales, colinas y cerros poco elevados. Desde luego existen diferencias entre la vegetación de las montañas y la de la llanura.

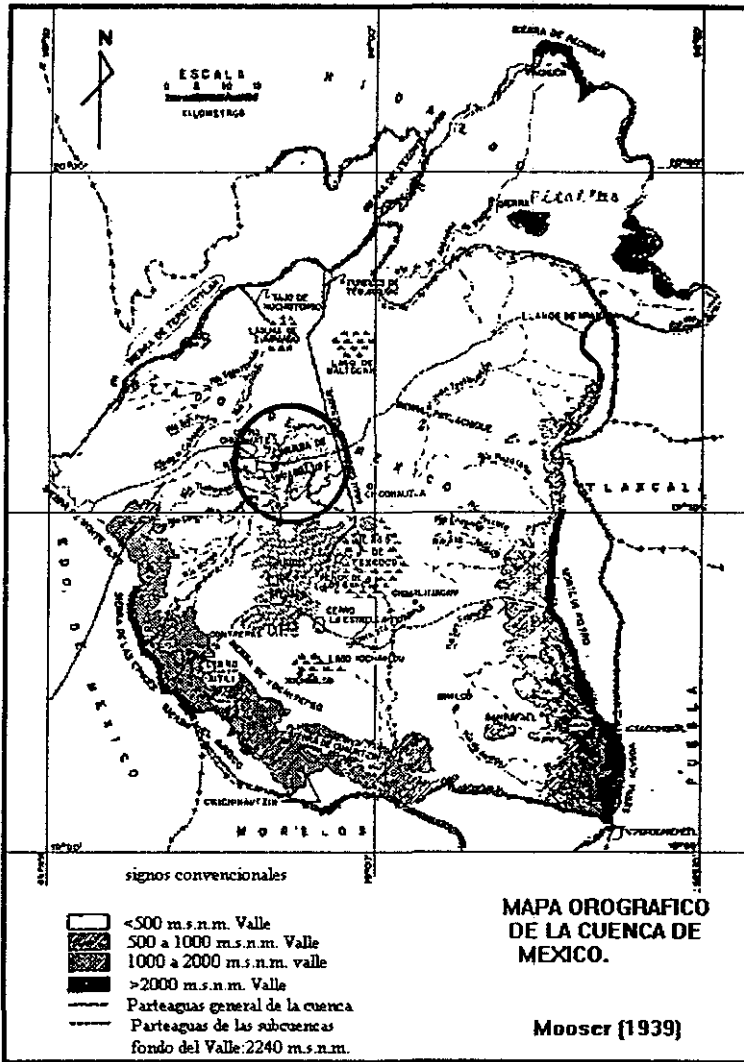


Fig. II.1 Localización de la Sierra de Guadalupe dentro de la Cuenca de México.

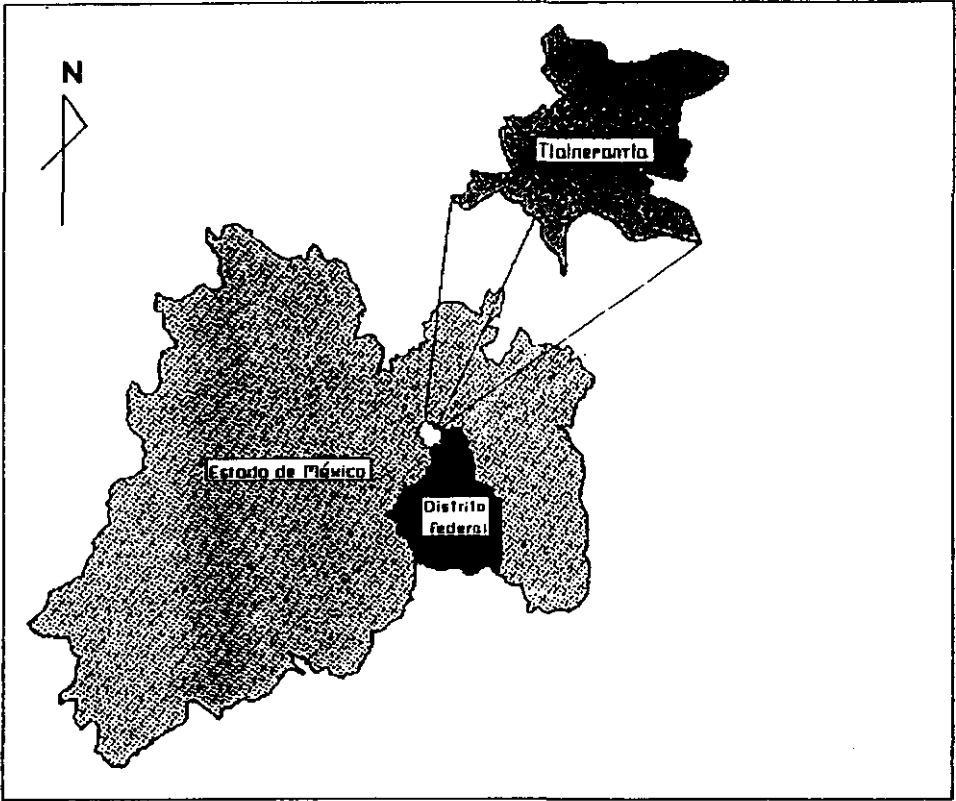


Fig. II.2 Localización del área de estudio.



Fig. II.3 Area de estudio en colindancia con el Panteón Jardines del Recuerdo.

Las plantas más abundantes en las montañas son las cactáceas. Prácticamente todos los cerros con elevación igual o superior a 2400 m.s.n.m. están cubiertos de *Acacia* sp. y *Opuntia* sp. (huizaches y cactus).

Arriba de 2600 m.s.n.m. se presentan encinos que forman pequeños bosques. La zona de los valles del Sur y el Este de la Sierra es mucho más fértil que el resto de la llanura, allí hay magueyes y pirules.

II.4 HIDROLOGIA

Lo accidentado del terreno y la pequeña extensión de la Sierra, no permiten que las aguas que bajan de sus cimas se reúnan para formar corrientes fluviales de consideración. Por el contrario, los cauces se encuentran sumamente olvidados, dando lugar a torrentes efímeros, en la estación lluviosa, y que durante el resto del año permanecen secos.

Estas corrientes después de recorrer espacios cortos, pero de fuertes pendientes se reúnen en un solo cauce de inclinación más suave y sección irregular, en la región donde terminan; su sección se ensancha rápidamente y su pendiente se hace casi nula, lo que origina un depósito casi instantáneo de los elementos más pesados que el agua trae en suspensión. La red hidrológica que presentaba la Sierra de Guadalupe era radial con corrientes intermitentes y de escasa longitud, mismas que drenaban hacia los principales tributarios que desaguaban hacia las cuencas de los extintos lagos de Texcoco, Zumpango y Xaltongo

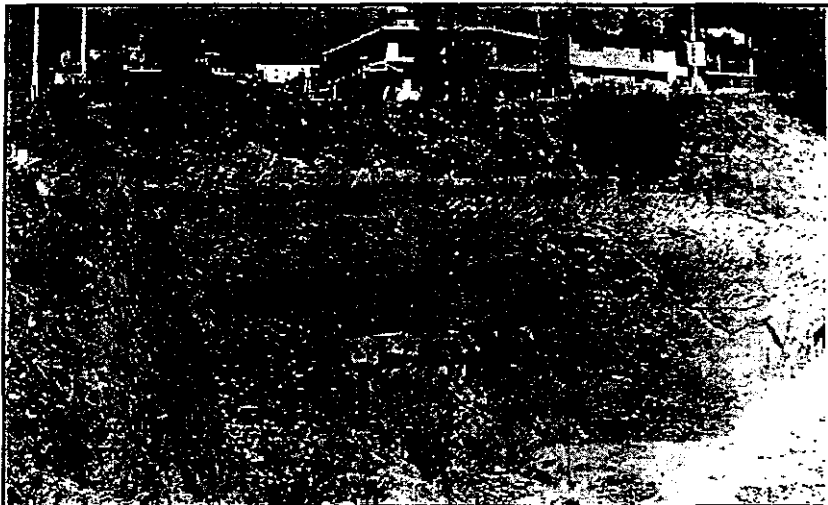
II.5 ASPECTOS SOCIALES Y VIALIDAD

En la actualidad el área está densamente poblada por grandes núcleos familiares de escasos recursos económicos que superan considerablemente en número a la de recursos medios y elevados, existiendo un desarrollo notorio de cinturones periféricos de miseria como es el caso de la zona Sur y parte de la zona Poniente de la Sierra de Guadalupe.

Debido a éstas características socio-económicas del Municipio, existe gran demanda de vivienda junto con una sobrepoblación que sigue extendiéndose con sus construcciones a las laderas de los cerros; sin importarles mucho el peligro al que se exponen, como se muestra en la *Fotografía No. 1*

Hacia el Norte es apreciable una unidad habitacional, en donde se ofrecen viviendas de bajo costo en edificios multifamiliares (*Fotografía No. 2*), lo que ha ocasionado una fuerte afluencia de vehículos automotores que van desde los particulares y microbuses, hasta los trailers de doble semiremolque; que desafortunadamente transitan sobre las Calles Continuación de Seminario y Seminario (en la corona del talud), donde apareció la fractura concoidea considerable (*Fotografías No. 3 y 4*).

En primera instancia se colocaron dos toques vehiculares; con el objetivo de limitar la afluencia y la velocidad del tránsito de vehículos pesados, los que a su vez generaron fuertes vibraciones en el talud, resultando ser un parámetro más a considerar en el problema de inestabilidad del terreno. (*Fotografía No. 5*).



Fotografía No. 1 Imagen que muestra las construcciones en las laderas del talud.



Fotografía No. 2 Imagen que muestra viviendas de bajo costo en edificios multifamiliares.



Fotografía No. 3 Las flechas muestran la superficie potencial de falla que se manifestó en la Calle Seminario.



Fotografía No. 4 Las flechas ilustran (en acercamiento) la misma superficie potencial de falla.

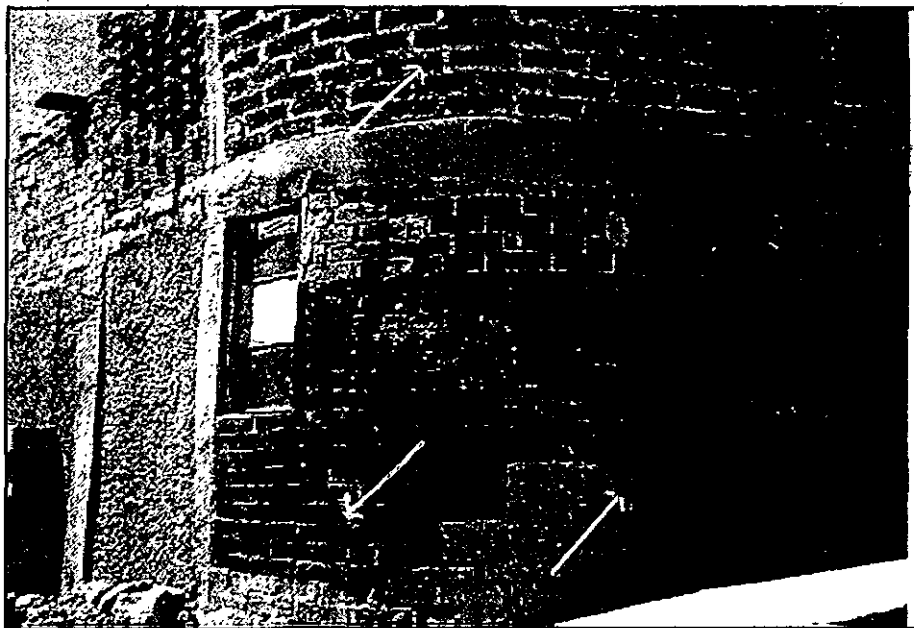


Fotografía No. 5 Las flechas indican los topes vehiculares colocados sobre la Calle Seminario (en la corona del talud).

II. 6 TIPO DE CONSTRUCCIONES

Los tipos de edificaciones construidas en el lugar son generalmente casas-habitación de dos niveles, fabricadas de concreto y materiales prefabricados, lo que se ha considerado como un factor de sobrecarga en el análisis del comportamiento mecánico del talud.

Desafortunadamente en la esquina que forman las Calles de Morelos y Seminario, se localiza una casa de ladrillo con un agrietamiento considerable; presumiblemente ocasionado por el hundimiento generado en el talud; el cual se ha manifestado en forma de agrietamiento sobre la calle Seminario, alcanzando una de las paredes de la vivienda, (*Fotografía No. 6*).



Fotografía No. 6 Las flechas muestran las cuarteaduras en una de las paredes de la casa ubicada en la esquina de las calles de Morelos y Seminario.

III GEOLOGIA GENERAL

III.1 MARCO GEOLOGICO REGIONAL DE LA CUENCA DE MEXICO

Las rocas más antiguas que afloran en la Cuenca de México se asignan al Terciario Medio. La razón para colocar al grupo volcánico más antiguo en el Terciario Medio, es porque sus elementos yacen en la Cuenca del Río Amacuzac, como lo demostró Fries (1956), discordantes sobre el Grupo Clástico Balsas, cuya edad queda indirectamente establecida como del Eoceno Tardío y Oligoceno Temprano, gracias al hallazgo de vertebrados fósiles en depósitos semejantes de Guanajuato (Fries, Hibbard y Dunkle, 1955, en "Origen, estratigrafía y petrografía de la Cuenca de México y Sierras circundantes". Hernández, H.F.).

Segerstrom (1956), correlaciona una serie de derrames, brechas masivas, tobas y tobas brechoides, de la Sierra de Pachuca, con la Andesita Xochitepec, del extremo Sur de la Sierra de Guadalupe. La parte inferior de la serie, en la Sierra de Pachuca, ha sido fechada con aproximación por el hallazgo de restos vegetales, ya que una especie muy semejante a Tectochara Tornata (Reid y Groves, en "Origen, estratigrafía y petrografía de la Cuenca de México y Sierras circundantes". Hernández, H.F.), ha sido identificada por R. E. Peck, del U.S. Geological Survey en ejemplares recogidos por Carl Fries Jr. y por Segerstrom, en las intercalaciones calcáreas de las andesitas inferiores de la Sierra de Pachuca, en 1955. Peck afirma que esta especie se encuentra en el Ludiano (Eoceno de Inglaterra), en el Stampiano y en el Chatiano (Oligoceno de Europa Central).

Carl Fries Jr. (1960), reporta unidades volcánicas del Terciario Medio, como rocas volcánicas y depósitos clásticos interestratificados, formados principalmente por materiales volcánicos. Una de las unidades es la riolita Tilzapotla. La edad de la riolita Tilzapotla fue reportada por H. W. Jaffe (C. Fries op. cit.) y sus colegas, por el método radiométrico plomo/alfa en circón, asignándole una edad de 26 millones de años, con límites de error posiblemente en exceso del 10% y correspondiéndole una edad del Oligoceno Tardío. En edad aunque no en litología, la riolita Tilzapotla puede corresponder a la parte basal de la Serie volcánica Xochitepec (Mooser, 1956). Las andesitas de Zimapán y Pachuca han sido fechadas del Mioceno por Cantagrel y Robin (Demant, 1978).

Estas rocas constituyen la Formación Xochitepec (Mooser, 1962). Los afloramientos típicos de esta formación se encuentran en la Sierra de Xochitepec, situada al Sur de la Ciudad de México. El contenido litológico es muy variable y comprende andesitas basálticas, andesitas, dacitas y latitas.

Entre los materiales del Terciario Medio se reconocen, también; restos de enormes volcanes estratificados, corrientes de lava, tobas, brechas, suelos fósiles, depósitos laháricos y fluviales. Este conjunto está atravesado por chimeneas volcánicas y diques. Una

característica importante, es que no se haya conservado ninguna forma volcánica importante.

A esta formación pertenecen, según Mooser (1962) la base de la Sierra de Guadalupe, el Peñón de los Baños, el Cerro de Zacaltepec que sobresale de las lavas recientes del Pedregal de San Angel, las traquiandesitas expuestas en la base Oeste del Iztaccíhuatl y la base Este del Ajusco. Sin embargo, Carmen J. Schlaepfer (1966), restringe el nombre de Formación Xochitepec únicamente a las rocas que formaron la Sierra de Xochitepec y agrupa a los demás afloramientos bajo el nombre de "Rocas Volcánicas del Terciario Medio", por no tener evidencia de que éstas provengan de un mismo centro eruptivo.

Después de un lapso de inactividad volcánica, erosión y peneplanización, un nuevo ciclo de vulcanismo parece iniciarse con el emisión de lavas ácidas, dacitas y riolitas, que forman la base del grupo pliocénico (Mooser op. cit.).

En la región de Pachuca, estas lavas se designan con el nombre de Serie Zumate y en la Sierra de Guadalupe se les dio el nombre de Serie Dacítica Chiquihuite. Se les ha asignado una edad del Plioceno, pues parecen ser equivalentes a las dacitas de la Serie Zumate, para la cual se ha establecido una edad del Mioceno Tardío al Plioceno Temprano, gracias a un conjunto de plantas que data del final del Mioceno o de principios del Plioceno, de acuerdo con R. W. Brown, del U. S. Geological Survey y R.W. Chaney de la Universidad de California. Se ha identificado en material tobáceo que colectaron Y. F. Wilson y E. Wisses en lechos que están inmediatamente arriba de las andesitas del Oligoceno-Mioceno en la Sierra de Pachuca, cerca del Real del Monte, Hidalgo. Por sus relaciones con rocas más antiguas y más jóvenes es probable que la Serie Dacita Chiquihuite sea más o menos de la misma edad que la toba que contiene las plantas. Se incluye en este grupo (Mooser op. cit.) por su posición análoga, a la Serie Andesítica de la Sierra Nevada y a la Serie Andesítica de la Sierra de las Cruces.

Mooser (op. cit.), designa con el nombre de Andesita Iztaccíhuatl a las lavas superiores de la estructura de ese nombre y Andesita Ajusco a las lavas superiores del Cerro del Ajusco y la Sierra Nevada. Por otra parte Schlaepfer (op. cit.), llama formación Iztaccíhuatl a la nombrada Andesita Iztaccíhuatl por Mooser (op. cit.), y ya que las rocas tienen un rango mayor en su composición, prefirió descartar el término petrográfico del nombre de la formación. La Formación Iztaccíhuatl, comprende en ésta montaña, una serie de derrames lávicos sobrepuestos, principalmente porfídicos, de color gris más o menos oscuro. Los derrames superiores del Iztaccíhuatl, consisten (según Schlaepfer, op.cit.) aparentemente de una andesita de hornblenda de color rosado, aunque su composición química sea posiblemente más ácida.

Schlaepfer (op.cit.), nombra como Formación Ajusco, a la denominada Andesita Ajusco por Mooser (op. cit.) que comprende exclusivamente las lavas superiores del Cerro del Ajusco y de la Sierra de las Cruces, que descansan discordantemente sobre rocas volcánicas más antiguas, probablemente del Plioceno Temprano, y excluye las rocas

consideradas por Mooser en esta unidad del Iztaccíhuatl. Esta unidad puede correlacionarse con la Formación Las Cruces, por su posición estratigráfica similar.

C.J. Schlaepfer 1968, (en "Origen, estratigrafía y petrografía de la Cuenca de México y Sierras circundantes". Hernández, H.F.) designa como Formación Las Cruces al conjunto de rocas volcánicas que forman las Sierras de las Cruces y de Monte Alto y aparentemente en esta formación está incluida la Formación Ajusco arriba citada. Esta formación está constituida por una secuencia potente de brechas volcánicas epiclásticas, de composición principalmente andesítica, con intercalaciones de derrames lávicos. La formación descansa, sobre un plano erosional sobre rocas que son de edades comprendidas entre el Oligoceno Tardío y el Mioceno Medio. Mooser (1956), reconoce esta superficie de erosión a una altura de 3,200 mts. en la Sierra de las Cruces, y esta superficie la considera sobre las rocas de la Serie Xochitepec. Schlaepfer (op. cit.) asigna la superficie de erosión a "Las Rocas Volcánicas del Terciario Medio", las cuales son correlacionables con la Serie Xochitepec, descrita por Mooser (op. cit.).

Hace menos de un millón de años se inicia el último ciclo de vulcanismo cuyas manifestaciones aún persisten en nuestros días. (Mooser op.cit.). Estudios recientes sobre el Iztaccíhuatl muestran que este volcán tiene una edad radiométrica menor de un millón de años (Nixon in Demant, 1978), cuando se iniciaron las erupciones volcánicas que constituyeron el último y más reciente ciclo de efusiones ígneas de la Serie Basáltica Chichinautzin, creando volcanes como el Cerro Gordo al Norte de Teotihuacán. Poco después la actividad volcánica se desplazó hacia el Sur, creando volcanes como el de Chiconautla, el de Chimalhuacán y de la Estrella. Esta parte comprende basaltos con cuarzo, basaltos sin olivino, andesitas basálticas y andesitas de anfíboles y piroxenos que forman la barrera volcánica que cerró, definitivamente, hacia el Sur, el gran espacio entre la Sierra de Las Cruces y la Sierra Nevada, formando así una sola y enorme cuenca.

Por lo que toca a los sedimentos que se encuentran rellenando la Cuenca, éstos se clasifican en tres grandes grupos (Arellano, 1953). 1.- Sedimentos anteriores al vulcanismo Mio-Pliocénico; 2.- Sedimentos contemporáneos al vulcanismo Mio-Pliocénico y 3.- Sedimentos posteriores al vulcanismo Mio-Pliocénico.

La "Cuenca de México" quedó formada por las altas montañas que la circundan a la terminación del Plioceno (Zeevaert, 1952). Grandes torrentes debieron de haber erosionado y transportado las rocas andesíticas desintegradas hacia el centro de la Cuenca, rellenándola paulatinamente. Los materiales de consistencia suave fueron erosionados rápidamente y transportados a la Cuenca. La acumulación de sedimentos siguió su curso en la Cuenca de México; los materiales gruesos quedaron en la orilla y únicamente los materiales finos del tamaño de la arcilla y limo fueron transportados hacia el centro del lago.

Oviedo de León (1970), asume que la Cuenca, probablemente se formó a consecuencia del levantamiento de las rocas Cretácicas a fines de la Revolución Laramídica. A causa de la actividad ígnea, la cuenca es subdividida en subcuencas por los

aparatos volcánicos, presentándose condiciones climatológicas que favorecen la evaporación de las aguas sulfatadas lo cual provoca la precipitación de grandes cantidades de yeso, con variaciones en el contenido de sulfatos y arcillas; solamente así es posible explicarse un espesor tan potente de anhidrita en la cuenca continental. ("El Conglomerado Texcoco y el Posible Origen de la Cuenca de México", Oviedo de León, 1970).

Fuertes erupciones volcánicas arrojaron gran cantidad de material piroclástico, principalmente fino, cubriendo aluviones gruesos (Zeevaert op. cit.). La lluvia lavaba también los polvos finos en suspensión en el aire depositándolos en el lago. Este lapso se ha denominado Tacubaya. Un período semiárido muy intenso parece haber ocurrido al final del tiempo Tacubaya, produciéndose, en las partes altas de la Cuenca; desarrollos de caliche que se caracterizan por ser capas delgadas, que se han denominado Caliche Morales.

Nuevas erupciones acompañadas de lluvias de material piroclástico, se acumularon sobre el Caliche Morales y representan a la Formación Becerra. Esta Formación representa facies lacustres en la región. A la terminación del Tiempo Becerra se encuentra otro desarrollo de caliche, que se conoce como Caliche Barrilaco, que viene a definir las postrimerías del Pleistoceno y, prácticamente, a cerrar toda actividad volcánica mayor en la Cuenca de México.

Sin embargo, la última actividad volcánica, producida al Sur de la Sierra del Ajusco, queda representada por una corriente de lava conocida como "El Pedregal de San Angel" que se extendió hasta la región lacustre de la Cuenca. Data de unos 2400 años atrás, según la cronología arqueológica relativa a las tribus arcáicas cuyos restos fueron sepultados por esta corriente de lava en Cuicuilco.

III. 2 TECTONICA

Para poder conocer el proceso volcánico en la Cuenca de México, debemos entender que la historia geológica está íntimamente ligada a la tectónica ya que por las fracturas asciende el magma y sobre ellos se forman los volcanes. La corteza terrestre está sometida a esfuerzos, algunos de alcance continental, y otros únicamente de tipo local. Es por esto que es importante analizar el origen de los fracturamientos, al estudiar la Cuenca de México. Basado en lo anterior se han podido diferenciar siete fases de vulcanismo, las cuales a continuación serán objeto de comentario:

La primera fase se presenta como vulcanismo de composición intermedia a ácida, definida como la del Terciario Inferior; sus elementos no afloran en la Cuenca de México, pero se ha encontrado a 2265 mts. de profundidad en el pozo denominado Texcoco.

Es importante mencionar que el vulcanismo se inició a fines del Eoceno, posterior a los plegamientos de las formaciones marinas, y de su emersión del mar. También se distinguen cantos rodados de calizas formado rellenos en sinclinales y fosas tectónicas,

encontrándose intercalados con depósitos de yeso (indicios de lagunas evaporadas en climas semiáridos), y en ocasiones con tobas volcánicas.

Para la segunda fase se encontraron series volcánicas compuestas de lavas intermedias y ácidas, con abundantes ignimbritas y tobas; conteniendo además depósitos fluviales. De las rocas ígneas podemos decir que son las más antiguas de la Cuenca, las pertenecientes a esta fase, y afloran en el Noroeste. En esta segunda fase se presentan complejos intensamente fracturados distribuidos en fosas y pilares dirigidos al Noroeste. Complejos de lava fenobasáltica se estudiaron y arrojaron una edad absoluta de 32 millones de años, perteneciendo al Oligoceno Medio.

En la tercera fase se determinaron por lo general dacitas y se encuentran en la base de las Sierras Mayores al Este y Oeste.

Las grandes fracturas y su avanzada erosión las define y diferencia de complejos más jóvenes. Algunas elevaciones que pertenecen a esta fase son: Peñón de los Baños, Cerro del Tigre, Cerro de Santa Isabel, Los Islotes de Cuatepeque y Tepetzingo; así mismo, los Cerros de Tlapacoya, Zacatepetl y Chapultepec.

De la cuarta fase de vulcanismo, podemos decir, que se debe principalmente al Complejo de la Sierra de Guadalupe, caracterizado por lavas intermedias y ácidas, así como las Sierras de Tepetzotlán, Las Pitallas, el Patlachique y el Tepezán, las cuales constituyen el grupo de las Sierras Menores, demostrando menos tectonismo, conservando sus formas cónicas originales debido a su menor edad (12 a 14 millones de años). Una característica de ésta fase es la formación de domos dacíticos, como los cerros Tenayo y Chiquihuite al Sur de la Sierra de Guadalupe.

La quinta fase de vulcanismo se inició a fines del Mioceno y, marcan la formación de las Sierras Mayores que fijaron los límites Poniente y Oriente de la Cuenca: La Sierra de las Cruces, Sierra de Río Frío, y Sierra Nevada, las cuales fueron producto de efusiones andesíticas y dacíticas, a través de estrato-volcanes, creando de esta manera extensos abanicos volcánicos.

Esta quinta fase domina en el Terciario Superior y perdura hasta el Cuaternario. Ya en el Cuaternario se inician las fases seis y siete, constituyendo en parte una continuación del vulcanismo del Terciario Superior.

En la sexta fase se determinan andesitas basálticas, Los cerros del Peñón de Marquez y los Pinos en el Sur de la Cuenca; mientras que en el Norte, conos y domos del Iztaccíhuatl y el gran cono del activo Popocatepetl.

La séptima fase culmina con la construcción de la gran Sierra del Chichinautzin durante el Cuaternario Superior, la cual obstruyó el antiguo drenaje al Sur y creó una Cuenca cerrada, la moderna Cuenca lacustre de México, asemejando de ésta forma, una

gigantesca presa azolvada. Todas estas fases (siete) son producto de procesos tectónicos originados en la expansión de la cresta submarina del alto del Pacífico Oriental.

III. 3 MORFOLOGIA Y FISIOGRAFIA

La Cuenca de México se sitúa en el extremo Sur de la Mesa Central entre los meridianos 98^o 15' y 99^o 30' y los paralelos 19^o 00' y 20^o 15'. Se encuentra en el centro de una gran zona volcánica, cuyas erupciones ocurridas en distintas fases formaron acumulaciones inmensas de lavas, tobas y brechas. Estas fueron principalmente expulsadas por otras formas volcánicas como son: Los conos de edad joven del Xitle, Tecajete, de la Sierra Chichinautzin y de la Sierra de Santa Catarina; así como también por los elevados como el estrato-volcán del activo Pococatépetl. Igualmente el Iztaccíhuatl el cual por estar ya con mayor erosión debido a glaciaciones, se encuentran con una morfología más compleja. Sin embargo, las erosión mayor probablemente son las Sierras de Guadalupe y de Tepozotlán que esconden los rasgos volcánicos originales. Finalmente carentes de toda forma volcánica individual, aparecen las Sierras dispersas a través de toda la cuenca, principalmente en el Sureste y Suroeste, constituidas por acumulaciones de productos volcánicos, emitidos en diversas fases y prácticamente destrozadas por movimientos tectónicos de importancia y modelada por varios ciclos de erosión. Entre las formaciones más antiguas figuran la Sierra de Xochitepec, el Cerro de Zacatepetl y el Cerro de Chapultepec, principalmente, (Fig. III.1).

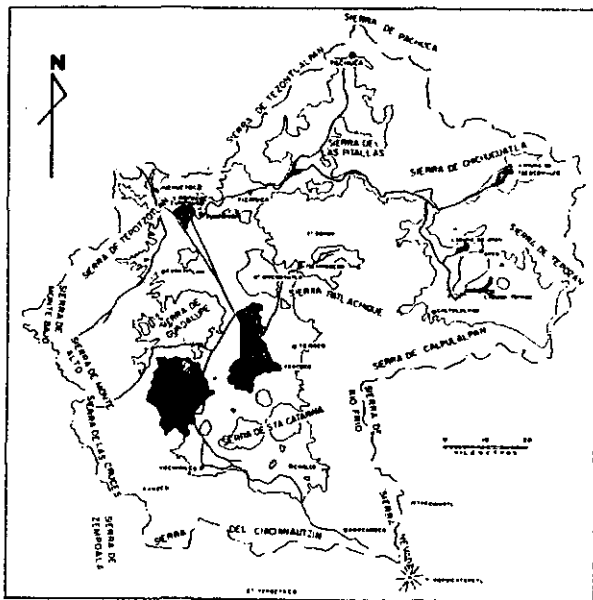


Fig. III.1 Fisiografía de la Cuenca de México.

La Cuenca de México cubre un área de aproximadamente 9600 km², teniendo una altitud que oscila entre 2,240 mts. en el Sur y 2390 mts. en el Norte.

Siendo una Cuenca cerrada contiene varios lagos someros, siendo el de Texcoco el que ocupa el nivel más bajo en el centro de entre todos. Le sigue en importancia la Laguna de Zumpango, en el Noroeste, mientras que el Lago de Chalco dejó de existir a principios de siglo y era el tercero en importancia. Estos son los últimos vestigios de numerosos lagos mayores que, a final de la época glacial probablemente formaban un solo gran cuerpo de agua de poca profundidad.

La Cuenca de México, se puede dividir fisiográficamente en tres zonas:

1.- Meridional, 2.- Septentrional, y 3.- Nororiental.

1.) Zona Meridional.- Se encuentra limitada al Este por las Sierras Nevada y Río Frío; al Oeste por la Sierra de las Cruces; al Sur por la Sierra de Chichinautzin; y al Norte por las elevaciones de la Sierra Guadalupe, el Cerro de Chiconautla y la Sierra Patlachique principalmente.

2) Zona Septentrional.- Esta se encuentra ligada a la zona meridional por un "cuello de botella", situado entre el Cerro de Chiconautla y la Sierra de Guadalupe, recibiendo el nombre de Estrecho de San Cristobal. Esta zona representa en parte la continuación de la planicie meridional, y se extiende hacia el Norte, hasta las estribaciones de la Sierra de Pachuca. Hacia el Oeste y el Noroeste, algunas elevaciones forman un parteaguas muy irregular, en donde se cuentan las Sierras de Monte Alto y Tepotzotlán así como algunas prominencias menores. El parteaguas Norponiente está constituido por la Sierra de Tezontlalpan, que representa un bloque antiguo, fallado y hundido al Sur.

3) Zona Nororiental.- Ocupando una superficie menor que las anteriores, representa un área compleja en la que una multitud de elevaciones volcánicas menores y aparentemente sin orden dominan el paisaje. Extendiéndose en una ancha franja hacia el Este, ocupa un espacio llano y extenso ante las cumbres de la Sierra de Pachuca y Río Frío. Carente de un drenaje bien definido, los arroyos se pierden en pequeñas cuencas cerradas y dotadas de un clima semi-desértico.

Sistema de drenajes.- Desde fines del siglo pasado, la evidencia geológica indicaba que la Cuenca desaguó en el Plioceno al alto Amacuzac por dos valles: el de Cuautla y el de Cuernavaca. El cierre de la Cuenca se debe al desarrollo de la Sierra de Chichinautzin, observado por el mapeo llevado a cabo en 1956 (Mooser y Fries), y que abarca toda una gran masa de fenobasaltos Cuaternarios, que se extienden entre la Sierra Nevada y el Ajusco, sepultando en su centro las masas del Tepozteco, antiguo parteaguas entre dos valles del Terciario Superior. Este cierre fue comprobado con mediciones paleomagnéticas y se verificó principalmente en el Cuaternario Superior apenas dentro de los últimos siete mil años.

Las últimas evidencias logradas confirman al citado desagüe de la Cuenca del Sur para el Plioceno; además ha sido posible reconstruir dentro del espacio de la Cuenca la red fluvial prechichinautzin.

III.4 ESTRATIGRAFIA

A la Cuenca de México pertenece la Formación Tarango, misma que se presenta interestratificada con las series lávicas de las sierras mayores (Sierra de las Cruces) donde se originó. Sobreyacen los abanicos volcánicos Tarango a los depósitos volcánicos del Terciario Medio (Formación Xochitepec) y del Mioceno Superior (sierras menores; Sierra de Guadalupe y Tepotzotlán). Asimismo subyacen a los depósitos clásticos aluviales y del Cuaternario (*Tabla 3*).

Mientras que la Formación Tarango presenta en forma de grandes abanicos todos los elementos piroclásticos derivados de las erupciones de las sierras mayores, a los pies de las sierras menores se acumulan cenizas y pómez de caída.

Es por esto que en el caso de la Sierra de Guadalupe, se encuentran sobre sus flancos numerosos horizontes de tobas y capas de pómez provenientes de erupciones de la Sierra de las Cruces, formando abanicos pequeños. También se han encontrado en este lugar lahares e ignimbritas; las cuales fluyen únicamente al pie de las sierras mayores; estando las tobas presentes en las bases de las sierras menores contenidas con material deslavado, considerándose entonces a los abanicos como aluviales. En la parte Oeste de la Ciudad de México se elevan las lomas, que constituyen el producto de las erupciones piroclásticas originadas en el volcán complejo del Cerro San Miguel. Este volcán se edificó a través de distintos ciclos de erupciones por lo que presenta esta morfología, proceso de la superposición de los distintos elementos integrantes de su abanico volcánico correspondiente.

En este abanico se ha podido subdividir en dos a la Formación Tarango, que se extiende desde San Angel, al Sur, hasta la Barranca del Río Hondo hacia el Norte. La primera denominada Tarango inferior que, representa la acumulación de piroclásticos esencialmente cineríticos y pumíticos, y en algunos casos lahares con fragmentos andesíticos.

Formación Xochitepec.

Esta unidad fue definida por Mooser 1962, en la Sierra de Xochitepec; al sur de la Ciudad de México con una litología muy variable, oscilando entre andesitas basálticas, andesitas francas con anfíboles y piroxenos, dacitas y latitas, tiene un espesor de aproximadamente 240 m.. Mooser (op. cit.) cita afloramientos de andesitas que considera pertenecientes a esta formación en el núcleo de la Sierra de Guadalupe, los cuales están alterados a caolín. Mooser (op. cit.), le asigna una edad del Oligoceno tardío al Mioceno temprano, por correlación con tobas y brechas de la Sierra de Pachuca; en donde colectaron

plantas fósiles muy semejantes a tectochara tornata (Reid y Graves) del Oligoceno de Europa Central (Segerstrom, op. cit.).

Esta formación presenta un Miembro que aflora en la base de la Sierra de Guadalupe, llamado Miembro Andesita Cuauhtepac de la formación Xochitepec. El espesor de este Miembro es de aproximadamente 3.0 m., en el afloramiento las rocas de esta unidad están sobreyacidas por un suelo que a su vez está cubierto por una brecha de composición andesítica. Las rocas que lo constituyen son de color amarillo verdoso y en cortes más frescos son de color gris verdoso, presentan un alto grado de intemperismo esferoidal, con una textura porfídica y estructura compacta. El límite superior está representado por una brecha andesítica y su base no aflora.

Formación Tarango.

Fue definida por Bryan (1948), el denominó como Formación Tarango; a los abanicos de los depósitos pseudoestratificados, conformados por tobas, aglomerados híbridos, grava fluvial de origen volcánico y capas de pómez, depositados en la base de las sierras que limitan la Cuenca de México al Este y al Oeste. La edad que se le asignó comprende desde el Plioceno superior hasta el Pleistoceno Inferior. Esta formación fue definida en la barranca del mismo nombre al Oeste de la Ciudad de México, donde existían las clásicas minas de "arena azul" en explotación.

Posteriormente Mooser (1975), dividió a la Formación tarango en dos miembros: Inferior y Superior, la cual se extiende desde San Angel, al Sur; hasta la barranca de Río Hondo al Norte. Para hacer esta división, Mooser se basó en una discordancia definida por el abanico volcánico originada por el volcán complejo de San Miguel.

Formación Tarango Inferior.

Representa la acumulación de piroclastos esencialmente cineríticos y pumíticos, aunque contienen también avalanchas ardientes y lahares con fragmentos andesíticos principalmente. Todo esto forma un abanico Pliocénico potente que sufrió durante un periodo prolongado tectonismo y erosión, cortándose por consiguiente barrancas profundas al Noreste. Según Mooser (op. cit.), la característica litológica que más resalta en la Formación Tarango Inferior es; el estado caótico en el cual aparecen depositadas las series piroclásticas, fragmentos angulares de andesita y pómez, se encuentran ligeramente cementados en una matriz de vidrio volcánico color rosa a menudo alterado, abundan también los horizontes de suelo derivados de la misma alteración de las cenizas en la parte superior de cada cuerpo durante un lapso sin actividad ígnea.

Formación Tarango Superior.

Corresponde a un periodo final de actividad volcánica, originada en el pleistoceno., ligada a la formación de una gran caldera. Se produjeron magmas, erupciones de pómez y piroclastos de andesitas y dacitas. Las capas de pómez cubrieron una topografía ondulada sobre grandes distancias, los piroclastos acabaron de rellenar las barrancas profundas, sobre todo la de Santa Fé, con potentes espesores de lahares y aglomerados ígneos que hoy

Tabla 3 Tabla estratigráfica de la Cuenca de México.

Escala geológica	Escala geológica	Escala geológica	Escala geológica		PISO	EDAD	SIERRA DE GUADALUPE		SIERRA DE LAS CRUCES			SIERRA NEVADA		SIERRA DE CHICHINAUTZIN			
			PERIODO	EPOCA			TARASCO		TARASCO			TARASCO		CHICHINAUTZIN			
C E N O Z O I C A C A	C U A T E R N A R I O	N E O G E N O	H O L O C E N O P L E I S T O C E N O	Holoceno (reciente)	FLANDRESE	TARASCO	TARASCO	F. CHICHINAUTZIN	TARASCO	TARASCO	TARASCO	TARASCO	TARASCO	TARASCO	TARASCO	TARASCO	
				WELCHBELENSE	F. TARASCO												F. CHICHINAUTZIN
				CEYENSE													
				SAALENSE													
				WELDENSE													
				CLYEMENSE													
				CRONEMENSE													
				MENAPIENSE													
				WALLENSE													
				ESBORNENSE													
TOLLESE																	
PRETILLENSE																	
VILLAFRANQUENSE	FORMACION SANTA MARÍA - PÉREZ	F. LAS CRUCES	F. SAJUCO	F. TEMOALCA	F. TETACOMATL	F. TLALOE	F. SAJUCO										
ADRIENSE	FORMACION BIGNIVUITE																
PLACENTENSE																	
PANNONENSE																	
SARONITENSE																	
VINDOBONENSE																	
MURCIANENSE																	
ARISTONENSE								FORMACION ANABUITA QUATEPEC	F. SOCHITEPEC	F. SOCHITEPEC	F. SOCHITEPEC						
CHATEENSE																	
STAMPENSE																	
SANNONENSE																	
T E R C I A R I O	P A L E O G E N O	M I O C E N O	O L I G O C E N O	PRABONENSE	FORMACION ANABUITA QUATEPEC	FORMACION ANABUITA QUATEPEC	F. SOCHITEPEC	F. SOCHITEPEC	F. SOCHITEPEC								
				LUTECIENSE													
				YPRESENSE													
				LAUDENSE													
				NORTIENSE													
A D A N T I C O	P A L E O G E N O	P A L E O G E N O	P A L E O C E N O	BARIENSE	FORMACION ANABUITA QUATEPEC	FORMACION ANABUITA QUATEPEC	F. SOCHITEPEC	F. SOCHITEPEC	F. SOCHITEPEC								
				LAUDENSE													
				NORTIENSE													

constituyen las minas de arena azules. Estos depósitos se definieron como Tarango Superior.

III.5 GEOHIDROLOGIA

La Cuenca de México se ha considerado como una gran presa azolvada cuyas cortinas se constituyen por una ancha masa de tobas y lavas jóvenes. El espacio represado consiste en dos valles sepultados; uno de estos prácticamente reducido con cabeceras en Texcoco y la Sierra de Paltachique, mientras que el otro mucho más extenso con cabeceras la Sierra de Guadalupe, Huehuetoca, La Sierra de Pachuca, Apan y la Sierra de Calpulalpan. Estos valles deben haber sido de pronunciado relieve en el Sur, ya que existen indicios de que su fondo estuvo a 1 700 m.s.n.m., casi 800 m. debajo de la planicie lacustre moderna determinada en el área de Xochimilco.

Esta cuenca en sus márgenes consiste: al Oeste, en los complejos lávicos de la Sierra de las Cruces, en el Este de las bases del Popocatepetl e Iztaccíhuatl. El vaso de esta presa contiene en sus laderas meridionales grandes abanicos volcánicos: en la parte Norte y Noroeste abundan complejos eruptivos del Mioceno, Plioceno y Cuaternario. Sin embargo, en el Noroeste abundan complejos del Oligoceno, caracterizados por su intenso fracturamiento. Aparte de todo esto, se encuentra cercana a la Sierra Tezontlalpan la traza de la falla profunda Nevado Pachuca, lo que por tener fuerte caída al Sur pone anticlinales de calizas marinas en contacto con tobas y rocas volcánicas debajo de los aluviones del Río de las Avenidas.

Debido a que la Cuenca de México es de tipo endorréico, el ciclo hidrológico era simple, (esto antes del crecimiento de la ciudad y de las obras de desagüe de Nochistongo y Tequisquiác).

Las infiltraciones que se originaban en las Sierras de la Cuenca forzosamente volvían a aflorar en manantiales a orillas de las planicies centrales a los pies de complejos volcánicos centrales que emergen de las arcillas lacustres. Sin embargo, esto ha cambiado en forma notable a raíz de los abatimientos artificiales producidos por pozos debido, como se ha mencionado anteriormente, a los excesivos asentamientos que han tenido lugar en la Ciudad de México.

Es importante comentar que las sierras y formaciones volcánicas, en las que al existir lluvias se producen infiltraciones o desarrollan escurrimientos, siguen dependiendo de ambos fenómenos .

Como ejemplo podemos citar la Sierra de Chichinautzin, la cual se encuentra cubierta por malpaíses geológicamente jóvenes, y en donde las precipitaciones pluviales son muy grandes pero que no muestra escurrimientos de importancia, y únicamente permite infiltraciones extraordinariamente grandes. En el caso de las lluvias existentes en el Suroeste de Tepetzotlán, en las elevaciones con grandes extensiones de abanicos volcánicos

compuestos de tobas y arcillas alteradas apenas logra infiltrarse, generando extraordinarios escurrimientos. Estos contrastes son la causa de la característica hidrológica tan típica de la Cuenca de México.

III.6 GEOLOGIA DE LA SIERRA DE GUADALUPE

La asociación de rocas basalto-andesita-riolita, que bordea al Continente americano por el Pacífico, constituyen una gran provincia en la que el vulcanismo y la Orogenia están asociados en el tiempo y el espacio Turner y Verhoogen (1962).

Ahora refiriéndonos a México, se puede decir en forma general que las rocas del Eje Neovolcánico y en particular las de la zona estudiada, se ajustan muy bien a lo dicho antes; pues la asociación de rocas ya citadas, hizo su aparición en las últimas etapas de la Orogenia Laramide que comenzó a fines del Cretácico y duró hasta principios del Terciario en la República Mexicana. Sin embargo, lo anterior no es suficiente para pensar que el Eje Neovolcánico sea una consecuencia de la Orogenia Mencionada.

La estructura volcánica resultante de una actividad ígnea, es determinada por la viscosidad del magma; es decir, que entre más alta sea esa viscosidad, mayor es la tendencia del magma a explotar por la pérdida de volátiles. En tal fenómeno se producen enormes volúmenes de material fragmentario y lava hirviente que dan como resultado las estructuras volcánicas denominadas estrato-volcanes. Si la viscosidad es aún mayor, se originan entonces los llamados domos volcánicos (A. Rittman 1963, op. cit.).

Ahora bien, la Sierra de Guadalupe se formó casi en su totalidad por brechas y lavas andesíticas con predominancia del material fragmentario; de lo cual se infiere que este complejo ígneo se constituyó de los materiales derivados de una actividad volcánica explosiva. La presencia de estructuras volcánicas cóncavas posiblemente provino, entre otros factores, por la acidez y la alta viscosidad del magma originador.

El estudio detallado de los volcanes constituye propiamente una especialidad del Geólogo, por lo tanto, solo ellos pueden opinar ampliamente de estos fenómenos. Lo que aquí se diga, es solamente con el intento de dar una idea general de dicho tema, ya que se encuentra íntimamente ligado a la Geología del área.

Son muchos los factores que definen el tipo de actividad volcánica; unos relacionados a las características intrínsecas del magma tales como contenido de gases, viscosidad y composición química, etc.; otros se relacionan con las características de la abertura volcánica (forma, tamaño, inclinación, etc.).

Basados en la clasificación de Rittmann, (op. cit.) se intentará clasificar a los volcanes de la Sierra de Guadalupe del modo siguiente:

1.- Volcanes simples de tipo central, caracterizados por la homogeneidad de su cuerpo. Se forman por una secuencia de piroclastos que alternan irregularmente con espesores variables de lava. Las erupciones parecen haber sido del tipo Peleano, caracterizadas por violentas explosiones intermitentes que lanzan al espacio fragmentos de roca y escasa lava, seguidas por periodos de tranquilidad de duración variable (Sapper 1939, en "Geología de la Sierra de Guadalupe", Lozano, B.). La razón de esta actividad intermitente obedece, entre otros factores, a la obstrucción consecutiva de la chimenea volcánica.

2.- Volcanes compuestos, son aquellos volcanes simples sobre los cuales aparecieron posteriormente domos o cualquiera otra estructura que hizo desaparecer la homogeneidad del cuerpo volcánico.

3.- Volcanes dómicos, son estructuras simples en forma de cúpula, originados comúnmente, cuando se acumula en un lugar dados grandes volúmenes de lava viscosa.

La lista siguiente corresponde a los nombres de los Cerros que forman la Sierra de Guadalupe y tentativamente se tratará de señalar el tipo de estructura volcánica que adoptan.

1.- Cerro del Chiquihuite, Cerro de Tianquillo: Domo sobre estrato-volcán (Volcán compuesto).

2.- Cerro de Ticomán, Cerro de Tenayo, Cerro Gordo, Cerro de Gachupines: Domo, (Volcán simple).

3.- Cerros Jacalón, Risco y Calavera: Un solo estrato-volcán (Volcán simple).

4.- Cerro de Guerrero, Cerro de Santa Isabel : Estrato-volcán (Volcán simple).

5.- Cerros Petlacatl, Cuahuítl, La Mesa y Las Cuevas, Colombo, Madrono, Jaguey, Juanalco, Calvario, La Cuesta, Tulpetlac, Córdoba, Picacho, Rambler, De la Cruz, y Del Panal : integran un estrato volcán (Volcán simple).

6.-Cerros de Santa Cecilia y Tlayapa : Dos estrato-volcanes juntos (Volcanes simples).

Los aparatos volcánicos están sujetos a muchas transformaciones, pues en ocasiones llegan a perder todos sus rasgos primitivos. Así por ejemplo se deforman, se destruyen, o aparecen de nuevo con otros caracteres, etc., con lo cual resulta una complejidad estructural difícil de entender.

En términos generales, la estructura de la Sierra de Guadalupe es la siguiente: se forma por un conjunto de estrato-volcanes sobrepuestos unos a otros, aisladamente cubiertos por volcanes de estructura dómica. Este conjunto de volcanes se distribuye en un círculo cuyo centro de actividad se localiza al Norte de Cuauhtepic; actualmente se encuentra muy erosionado y, solamente presenta remanentes o partes de lo que fue en un

principio grandes estrato-volcanes. Para poder hacer una reconstrucción y tener una idea de su estructura, se necesitó mucho trabajo de campo.

Las determinaciones anteriores, se dedujeron partiendo únicamente de los datos proporcionados por la geología superficial, ya que en el área no existe ninguna obra de subsuelo que pudiera aportar alguna información.

Los valores de inclinación y dirección en las corrientes de lava, se anotaron solamente donde las rocas presentan "seudoestratificación" bien marcada. En los estrato-volcanes, estos datos se tomaron desde un punto de vista general y solo indican la dirección del buzamiento de toda una secuencia estratiforme.

En la Sierra de Guadalupe afloran rocas volcánicas. El resultado de la fechación de dos muestras tomadas en ella (por el método K-Ar); arrojó edades de 15 ± 0.8 y 14.2 ± 0.7 millones de años respectivamente, por lo tanto estas rocas corresponden al Mioceno Superior. Dichas edades sirvieron de base para situar en el tiempo la columna estratigráfica que se muestra en la *Fig. III.2*.

La columna estratigráfica que forman estas rocas se puede dividir de la más antigua a la más joven como sigue:

UNIDAD 1.

Asociación de brechas volcánicas y lavas andesíticas. Esta unidad se compone por una alternancia de brechas volcánicas y lavas andesíticas con planos de pseudoestratificación muy irregulares. Los espesores de los derrames y depósitos volcánicos varían de 2 a 20 mts. en las andesitas y de 15 a 100 mts. en las brechas andesíticas. Esta secuencia de rocas no presenta horizontes índices que pudieran servir para subdividir la unidad en varias partes. En dicha "serie" de rocas irregularmente asociadas, predominan las rocas volcánicas con las siguientes características: fragmentos angulosos de rocas andesíticas; de color gris y negro, estos últimos muy vítreos; todos los fragmentos se encuentran unidos con pequeñas proporciones de arena volcánica. En algunas partes aparecen brechas de flujo.

La edad de esta unidad se determinó por medios isotópicos de K-Ar, correspondiéndole una edad del Mioceno Superior.

UNIDAD 2.

Se compone únicamente por andesitas porfídicas de color rosado, casi siempre "seudoestratificadas", con espesores variables según intemperismo diferencial del bandeamiento por fluidez. Forman estructuras volcánicas cóncavas; entendiéndose por esto, a las acumulaciones de lava viscosa que constituyen cúpulas de grandes dimensiones, (Cerros Tianguillo, Tenayo, Gordo y Chiquihuite). Estas lavas comúnmente presentan textura fluidal originándose el bandeamiento y "seudoestratificación" ya mencionada.

Estratégicamente las rocas descritas sobreyacen a la asociación de brechas y lavas de la Unidad 1.

UNIDAD 3.

Formación Tarango. Esta formación fue primero descrita por Bryan (1948), (en "Geología de la Sierra de Guadalupe", Lozano, B.), su localidad tipo está en la barranca de Tarango, en la colonia Mixcoac, de la Ciudad de México. Son tobas amarillentas del Plioceno Superior, compuestas por clastos acarreados por el agua; tienen además intercalaciones de material de erupciones volcánicas, mismo que tuvo como agente de transporte al viento. Se localiza sobre una superficie de erosión que se desarrolló en la cima de todas las formaciones Terciarias del Centro de México. Otros autores la correlacionan con la formación Atotonilco y Cuernavaca que afloran al Norte y Sur de la cuenca respectivamente.

En la parte Norte de la Sierra de Guadalupe, tal formación se encuentra bien desarrollada, formando grandes depósitos de tobas que descansan discordantemente sobre las rocas volcánicas de la Unidad 1 y 2. En el área mencionada no fue posible la localización de fósiles y solo se ha correlacionado por semejanza litológica y posición estratigráfica. Las tobas de esta formación son de color amarillento, constituidas por fragmentos de cristales de feldspatos, ferromagnesianos y vidrio volcánico; algunas caras de los minerales mencionados son angulosos, pero los más suaves se encuentran redondeados, indicando ligero transporte, posee estratificación cruzada que se acuña en los flancos de la Sierra.

UNIDAD 3-A.

Sobreyace a la formación Tarango, compuesta de tobas amarillentas deleznales, constituídas de fragmentos gruesos de pómez (0.5 cm - 1 cm.), aglutinados por sedimentos finos transformados parcialmente en arcilla. En la parte superior de esta unidad aparecen capas de ceniza volcánica fina de color gris, proveniente de las últimas erupciones del Cuaternario.

Los suelos que cubren a estos depósitos contienen horizontes con abundante cerámica, posiblemente del período Clásico o Preclásico (1000 a 1500 años A. de C.).

Dentro de la unidad se puede incluir la parte superior de los depósitos lacustres de la Cuenca de México.

III.7 GEOLOGIA ESTRUCTURAL DE LA SIERRA DE GUADALUPE

En la Sierra de Guadalupe aparecen dos sistemas de fracturamiento: uno se orienta de WNW a ESE y el otro en dirección NE a SW. El primero, parece pertenecer al sistema de fracturas del Eje Neovolcánico, al que probablemente está relacionado su origen. El

segundo (en dirección NE-SW) apareció posteriormente a la formación de la Sierra y es en la actualidad el mejor definido. Por último, casi normal, al anterior se formaron pequeñas fracturas secundarias.

Sistemas de Fracturas NE-SW.

Por interpretación en fotografías aéreas verticales, escala 1:50 000, se determinó un sistema de fracturas y fallas con dirección N 30 - 45 E.

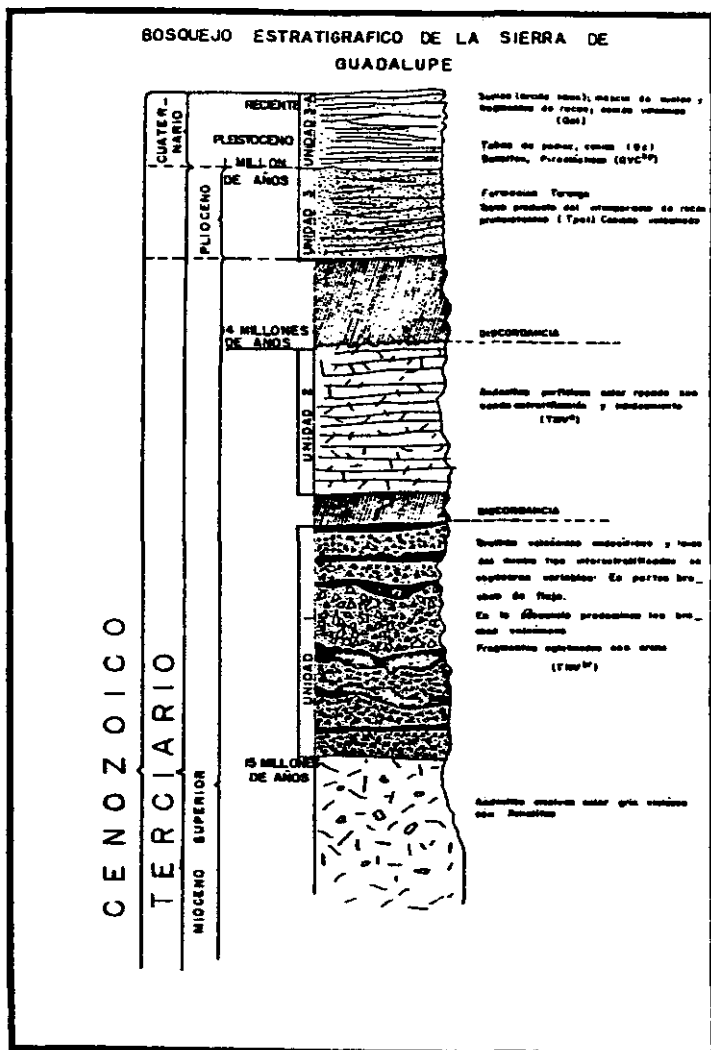


Fig. III.2. Bosquejo estratigráfico de la Sierra de Guadalupe. (Lozano, L., 1968).

Otras fracturas y fallas no tienen manifestación superficial alguna por haber sido cubiertas por, materiales de talud y fueron propiamente inferidas.

Los sistemas de fracturas y fallas descritas, probablemente obedecen su origen a fuerzas verticales; ya que la Sierra de Guadalupe a primera vista (forma circular) parece que se formó en un foco volcánico en el cual hubo consecutivamente emisiones de lavas y brechas asociado a hundimientos. También puede ser que estas fracturas pertenezcan al Eje Neovolcánico.

Es posible que el sitio principal de la actividad volcánica que integró a la Sierra de Guadalupe se localizó en la zona que en la actualidad presenta alteración hidrotermal y corresponde precisamente al Centro de la Sierra. Por otra parte de acuerdo a los rasgos morfológicos presentes en dicha zona, es muy probable que fuera afectada al fin del Plioceno por un hundimiento en forma de " graben " que bien pudo extenderse hacia el Sur de la Cuenca de México. Las manifestaciones de tal " graben " no son muy claras por efecto del vulcanismo y relleno de la Cuenca en el Pleistoceno y Reciente.

III.8 GEOLOGIA HISTORICA DE LA SIERRA DE GUADALUPE

A fines del Cretácico se originó el plegamiento que determinó la formación de la Sierra Madre Oriental; al encontrarse expuesta a la erosión, se inició por el Oriente la formación de la provincia denominada Planicie Costera del Golfo. Sobrepuetas a éstas dos provincias geotectónicas, apareció en el Cenozoico entre los 19^o y 20^o latitud Norte, un sistema de fallas y fracturas orientadas con un rumbo general E-W; en las cuales se desarrolló una gran actividad volcánica que produjo la formación del Cinturón Volcánico Trans-Mexicano de Cserna (1961, en "Origen, estratigrafía y petrografía de la Cuenca de México y Sierras circundantes, Hernández, H.F.). Según este autor el citado fenómeno geológico está más relacionado al sistema de fracturas que forman la trinchera México-Centroamericana que con el sistema Clarión.

Los datos de las edades absolutas de varias muestras de rocas tomadas en la Sierra de Guadalupe indican que dicho cuerpo se formó hace 15 millones de años, es decir, a fines del Mioceno y parece que su total desarrollo tuvo una duración aproximada de 0.5 a un millón de años.

Posteriormente al fracturamiento E-W que se relaciona con el Eje Neovolcánico en su sistema " Chapala-Acambay", hicieron su aparición los primeros volcanes de la Sierra de Guadalupe. Las rocas de tales volcanes fueron brechas y lavas andesíticas, al parecer con una mayor proporción de plagioclasa cálcica (andesitas gris oscuro), del tipo anterior quedan como remanentes dos cuerpos, uno correspondiente al Cerro del Panal y el otro localizado en el cerro próximo al poblado de San Andrés, de aspecto brechoide y composición andesítica y lavas andesíticas interestratificadas. Continuaron en orden de aparición las siguientes estructuras: En la parte Poniente de la Sierra, los Cerros de Santa Cecilia y Tlayapa, en la parte Oriental surgió una gran estructura estratiforme integrada por

los Cerros del Jaguey, Colombo, de la Santa Cruz, Calvario, Tulpetlac, Juanalco y otros. Posteriormente se formaron los Cerros del Risco y Calavera, luego el Petlacatl y el Cuahuatl.

En la etapa final de la formación de las estructuras de este tipo, se originó un volcán en los Cerros del Picacho y Córdoba, que juntos parece que constituyen un gran estratovolcán que cubrió gran parte de los previamente formados.

A fines del Mioceno y principios del Plioceno se registró un período de eyección de lavas muy ácidas y viscosas que al acumularse dieron lugar a los domos volcánicos de los Cerros del Tianguillo, Tenayo, Chiquihuite, Gordo y Ticomán.

Simultáneamente o quizá poco después, aparecieron al Sur del área dos volcanes de tipo basáltico brechoide que alternan con corrientes de andesita; estos volcanes formaron los cerros que actualmente son llamados de Guerrero y Santa Isabel.

Durante el Cuaternario apareció en la parte Noreste, y próximo a la Sierra de Guadalupe un volcán de lava basáltica escorácea (tezontles), su edificio propiamente ha desaparecido por efectos erosivos pero su presencia se manifiesta aún con una ligera elevación sobre el valle.

Los cuerpos anteriores, con excepción de éste último, fueron afectados durante el Plioceno por un sistema de fracturas y fallas que hasta el presente es el más notable, tal sistema tiene una orientación N 30 a 45° E.

Cuando cesó la actividad volcánica comenzó a depositarse la formación Tarango a partir de los residuos de ceniza, lapilli y rocas preexistentes, según algunos autores fue el agua el principal agente de transporte; otros opinan que intervino fundamentalmente en la constitución de ésta formación, las cenizas y lapillis que vinieron de otros volcanes, pero que el agente de transporte fue el viento y no el agua, pues así lo demuestra el modo de estratificación y las características de tales depósitos.

A fines del Plioceno ocurrieron los fenómenos de alteración hidrotermal que causaron la caolinización que aparece en el centro del área.

En el Cuaternario, cubrieron a la Sierra de Guadalupe cenizas originadas por erupciones recientes de otros aparatos volcánicos, los remanentes de éstos depósitos ocupan áreas muy pequeñas, donde aún se pueden apreciar tobas finas de ceniza volcánica de color gris, alteradas parcialmente a bentonita.

Aunque la etapa fisiográfica actual de la Sierra de Guadalupe es de juventud, la morfología primitiva de los cuerpos volcánicos que la integraban ha desaparecido por completo; de tal manera que resulta difícil hacer la completa reconstrucción de la estructura de cada uno de estos aparatos.

IV TRABAJOS PREVIOS

A continuación se presenta una breve recopilación de los trabajos previos que existen del talud "El Cantil". Se incluyen estudios Geológicos, Geofísicos y Mineros a semidetalle; que muestran una idea más clara de las condiciones generales bajo las cuales estaba regido el talud; después de que se presentaron los primeros indicios de inestabilidad en él.

IV.1 ESTUDIO GEOLOGICO LOCAL

Los estudios geológicos realizados, indican que la zona donde se asentó la Colonia San Rafael; es de origen volcánico y que estos materiales formaron el Cerro Tlayacampa; que esta ubicado en la parte Occidental de la Sierra de Guadalupe cuyo origen es volcánico también. Topográficamente, el Cerro Tlayacampa esta situado entre las cotas 2300 y 2400, presentando en sus laderas fuertes pendientes que en algunos lugares son prácticamente verticales.

Las rocas volcánicas andesíticas que lo constituyen tienen estructura fluidal, lo que ha permitido obtener buenos recursos económicos explotándolos como materiales para la construcción.

Las rocas andesíticas están cubiertas por depósitos más recientes, constituidos por arenas que alternan con tobas; en capas que varían de delgadas a gruesas y con diferentes grados de compacidad, mismos que han sido explotados a cielo abierto recientemente y como obras subterráneas para materiales de construcción en la antigüedad años atrás.

Destacan dos capas arcillosas con arenas finas; que se ubican entre los 2.5 m. y los 10 m. bajo el nivel del piso, siendo esta última; el pie del talud de la parte descubierta, probablemente relacionada con depósitos lacustres.

Este paquete de rocas se encuentra fracturado debido a la falta de material de soporte al interior del cuerpo del talud, siendo visibles las fracturas al exterior del talud y en el interior de la mina subterránea.

El análisis de las fracturas visibles; señala mecanismos de fallamiento por gravedad generado por debilitamiento producido por las excavaciones subterráneas y superficiales, representando una zona de gran inestabilidad.

El presente trabajo identificó dos unidades litológicas: *La unidad A*; constituida por roca volcánica y *la unidad B*; por depósitos vulcanoclásticos, mismos que se describen a continuación en función de su edad, composición y origen entre otros aspectos.

UNIDAD A: ROCA VOLCANICA

DISTRIBUCION

Esta unidad constituye la porción media y alta de la Sierra de Guadalupe, y localmente en el Cerro Tlayacampa ubicado al Nor-noroeste de la zona de estudio, probablemente se encuentra a muy pocos metros de profundidad por debajo de los materiales vulcanoclásticos.

LITOLOGIA

Dicha unidad esta constituida por roca ígnea volcánica, siendo clasificada petrográficamente como una Toba Cristalina Andesítica de textura piroclástica, el feldespato predominante es la andesina, relictos de anfíbol y minerales opacos. Ver estudio petrográfico (*Fig. IV.3*).

De acuerdo con numerosas dataciones isotópicas que se le han realizado a esta unidad por investigadores en sitios cercanos; se le asigna una edad del Mioceno Medio al Mioceno Tardío.

EXPRESION MORFOLOGICA

El relieve del Cerro Tlayacampa; el cual esta constituido mayoritariamente por la roca volcánica de esta unidad; presentó elevaciones entre los 2300 y los 2400 m.s.n.m. . Las pendientes en las cimas son inclinadas y en algunos sitios casi verticales, mientras que en las cotas 2320 y 2360 m.s.n.m. ésta es más bien tendida. La cúspide es semiredondeada, lo que indica un intemperismo intenso sobre una roca de alterabilidad media a alta.

ORIGEN

Flujo de piroclastos depositados sobre el relieve de la Cuenca de México.

UNIDAD B: DEPOSITOS VULCANOCLASTICOS

DISTRIBUCION

Esta unidad constituye las laderas del Cerro Tlayacampa y en estos materiales se localiza el hundimiento del terreno. En épocas pasadas fueron explotadas como materiales para construcción, mediante obras subterráneas (minas). Es en sí; el sitio propio del estudio.

La unidad cubre a la Toba Cristalina Andesítica del Terciario Superior, su contacto superior esta cubierto por depósitos aluviales del Cuaternario.

FACULTAD DE INGENIERIA DIVISION DE INGENIERIA EN CIENCIAS DE LA TIERRA DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA Y GEOTECNIA	
ESTUDIO PETROGRAFICO	
MUESTRA:	A ₁ (corte perpendicular a la estructura fluidal).
LUGAR:	Tlalnepantla de Baz. Estado de México.
UBICACIÓN:	Sierra de Guadalupe.
COLECTOR:	Ing. Luis Arturo Tapia C.
FECHA COLECCION:	Agosto de 1995.
FECHA ESTUDIO:	Marzo de 1996.
REALIZO:	José Francisco Martínez Contreras.
DESCRIPCION MEGASCOPICA	
COLOR:	Bandeamientos rosáceos de tonalidades claras y oscuras.
TEXTURA:	Piroclástica.
ESTRUCTURA:	Fluidal.
COMPOSICION MINERALOGICA:	Compuesta por minerales subdrales de plagioclasa (60 %), cuarzo (7 %), homblenda (5 %), biotita (3 %) y fragmentos líticos (25 %).
TIPO DE ROCA:	Toba Cristalina.
DESCRIPCION MICROSCOPICA	
TEXTURA:	Piroclástica (Hipidiomórfica). Conformado por fenocristales subdrales y anedrales, de formas redondeadas y alargadas contenidos en una matriz de pequeños cristales aglutinados.
MINERALOGIA:	
- MINERALES ESCENCIALES:	Plagioclasa (andesina) 80 %, biotita (8 %), cuarzo (5 %).
- MINERALES ACCESORIOS:	Minerales opacos y arcillas rojas (7 %).
- MINERALES SECUNDARIOS:	Sericita y Clorita.
- MATRIZ O CEMENTANTE:	Matriz compuesta de pequeños cristales de plagioclasa, Minerales opacos y arcillas rojizas dispuestas a manera de flujo.
CLASIFICACION: Toba Cristalina Andesítica.	
OBSERVACIONES	
Se presentan estos tipos de alteración de los minerales (principalmente en los contornos de los mismos) :	
- Plagioclasa alterando a sericita.	
- Biotita alterando a clorita.	

Fig. IV.3 Estudio petrográfico de una muestra colectada en la Sierra de Guadalupe.

EXPRESION MORFOLOGICA

Tiene una fisiografía de lomeríos semi-redondeados bisectados por pequeños arroyos y bajadas de agua provenientes del Cerro Tlayacampa. Su relieve muestra una alterabilidad fuerte, generando en algunos sitios grandes bloques que por el intemperismo remontante se desprenden cuesta abajo, dejando escarpes verticales.

UTILIDAD PRACTICA

Utilizada en la construcción, para fabricación de tabiques y como relleno.

ORIGEN

Representa el relleno de Valles y Cuencas lacustres debido a la intensa actividad volcánica. Las secuencias piroclásticas observadas tienen un origen de flujo, así como de "surge" piroclástico.

LITOLOGIA

Depósito vulcano-sedimentario continental muy heterogéneo que comprende arenas poco consolidadas con intercalación de limonitas que alternan con tobas (líticas y pumíticas) poco consolidadas, de color café claro a crema con horizontes café oscuro, intemperiza en tonos ocre estando dispuestas según estratos y pseudoestratos en espesores que varían de delgados a gruesos. Los clastos tienen un rango granulométrico amplio y son por lo general, de composición intermedia y de textura melanocrática, los hay piroclásticos y epiclásticos. Estos líticos se presentan medianamente consolidados en una matriz arenosa.

Para la descripción local de detalle, fue necesario subdividir a la unidad en cinco subunidades (U_1 a U_5), de acuerdo a su composición, granulometría, color, consolidación o compactación, como se puede apreciar en el perfil geológico, (*Fig. IV.4*).

La descripción detallada se realizó sobre el talud de la capa superficial a la más profunda y es la siguiente:

U_1 Capa de arena de grano medio a grano fino, de color café claro a crema, sus clastos son equidimensionales-subredondeados. La composición mineralógica particular de los detritos es: pómez, feldespatos, micas, piroxenos y fragmentos de rocas andesíticas. La compactación es media y su densidad es baja. El espesor de capa es aproximadamente de 2.5 m..

U_2 Capa de arcilla con arena fina de color café rojizo de tonalidad clara. La composición de la arena fina se basa en clastos de cuarzo cristalino, feldespatos, piroxenos y poca pumita. Su compactación es de media a alta. El espesor de esta capa es de 1.5 m..

U_3 Capa de arena media de color café claro a café pardo. Los fragmentos son equidimensionales de subredondeados a subangulosos. Su composición es: cuarzo (1.5 a 2.0 mm.), pómez (8 mm.), mica (biotita de 2 mm.), piroxeno (2 mm.) y fragmentos de roca. Su densidad es baja y su compactación es de suelta a media. El espesor de capa es aproximadamente de 4.0 m..

Nota: Esta unidad fue la utilizada como horizonte de explotación, por lo tanto es el estrato donde se encuentran las minas.

U₄ Horizonte de arena gruesa, color café claro a crema equidimensional-subredondeada con tamaños que van de 5 a 20 mm., en una matriz de arena fina. La composición es pumítica (70 %), cuarzo cristalino y lechoso, feldespatos, micas y arcilla. La densidad es baja y su compactación es media. El espesor de capa es de aproximadamente 2.0 m..

U₅ Horizonte de arena fina arcillosa, de color café oscuro. Sus componentes son: cuarzo, feldespatos, poco pómez y arcilla. El espesor de esta no pudo ser determinado ya que constituye el pie del talud.

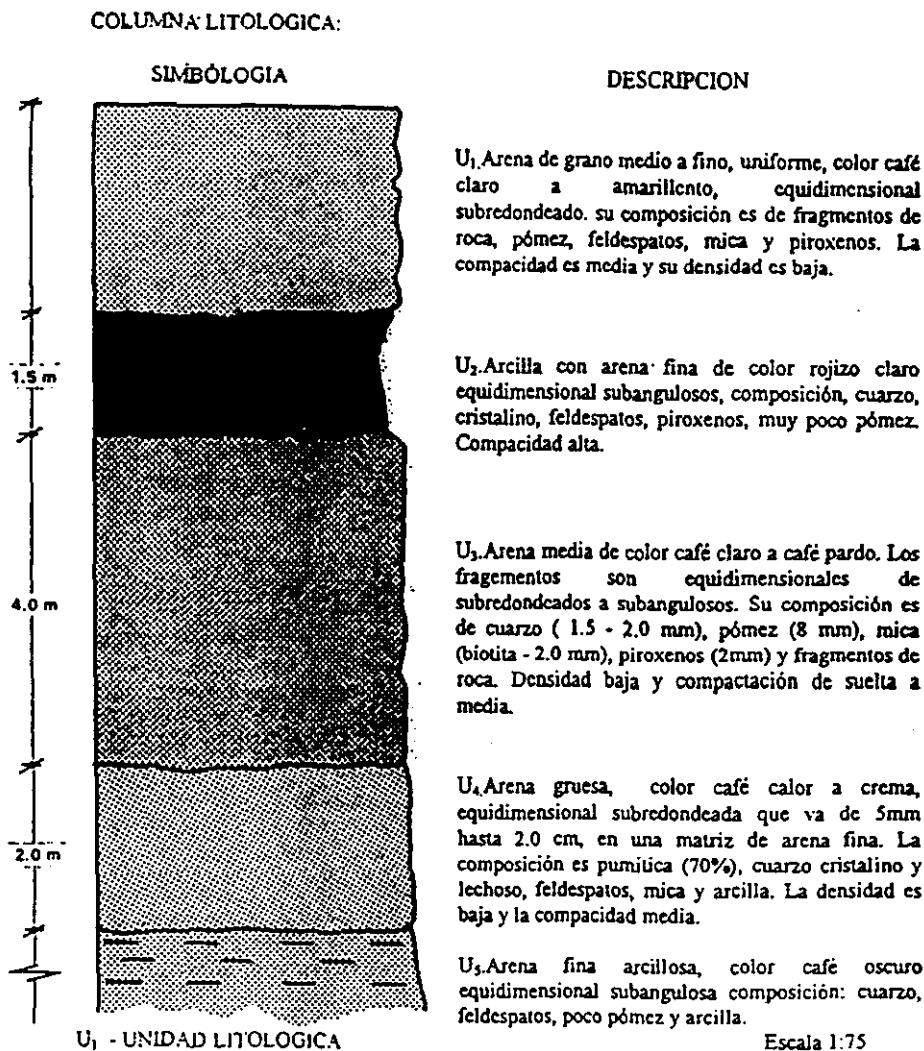


Fig. IV.4 Perfil geológico que muestra a las unidades mencionadas.

IV.1.1 GEOLOGIA ESTRUCTURAL

En el estudio estructural se procedió al levantamiento de las discontinuidades (fracturas) que eran observadas sobre los taludes artificiales dejados por la explotación de la cantera o el banco de materiales. Este trabajo fue realizado con brújula tipo Brunton y flexómetro, determinando la orientación de cada una de estas.

El primer análisis generado en este trabajo, fue la interpretación estereográfica de las fracturas existentes en el talud Nor-noroeste del sitio problemático. Las conclusiones desprendidas por este fueron:

Fracturas Número 1, 4 y 6.

La posición del polo de estas fracturas se encuentra frente a la proyección del plano del talud. Por ello, el mecanismo básico de falla fue interpretado como inestabilidad por volteo de talud, (*Figuras IV.5 a IV.7*).

Fracturas Número 2 y 3.

En estas se pueden observar sus polos ubicados por detrás del plano del talud, que indica un inminente mecanismo de deslizamiento por medio de fallas de tipo circular, (*Figs. IV. 8 y IV.9*).

Fractura Número 5.

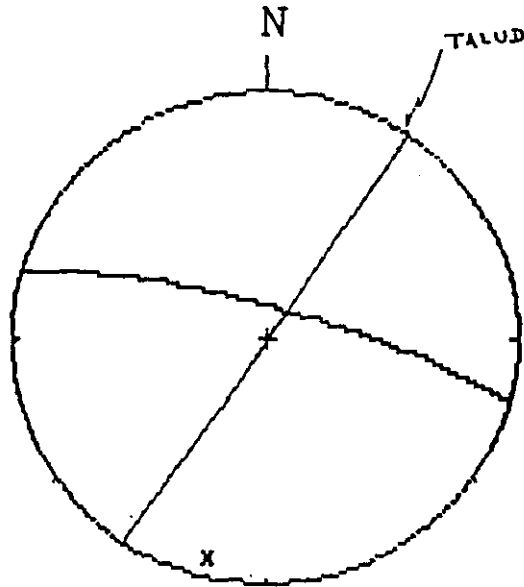
Esta fractura se encuentra a rumbo del plano del talud, por lo que su polo queda ubicado casi sobre este plano y su futuro comportamiento puede ser cualquiera de los dos casos anteriores, (*Fig. IV.10*).

Conclusión:

El análisis global de las fracturas, señala un mecanismo básico de *falla circular*; ya que no existe un patrón estipulado por los polos de cada fractura. Este fracturamiento tiene su origen en las excavaciones subterráneas (minas) y su rápida aparición en la superficie fue ocasionada por el tránsito vehicular y el agua de la temporada de lluvias, ver *Fig. IV.2*.

FRAC . 1

n = 1



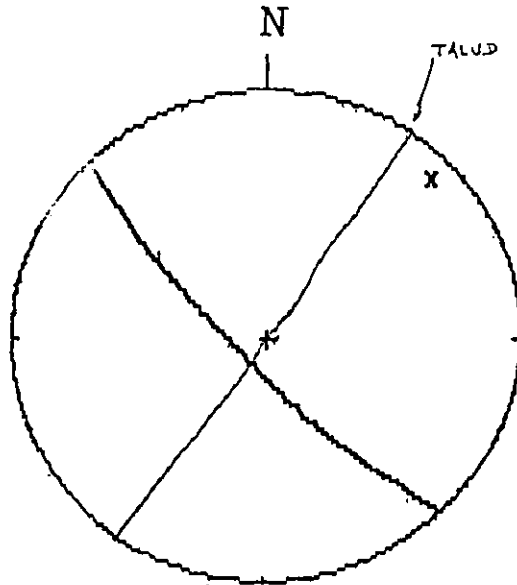
* n = 1

Schmidt net, Lower hemisphere projection

Fig.IV.5 Análisis estructural de la fractura número 1.

FRAC. 4

$$n = 1$$



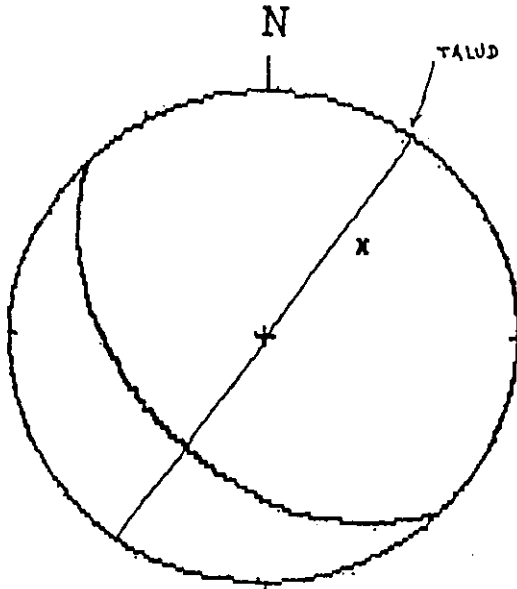
$$* \quad n = 1$$

Schmidt net, Lower hemisphere projection

Fig.IV.6 Análisis estructural de la fractura número 4.

FRAC . 6

n = 1



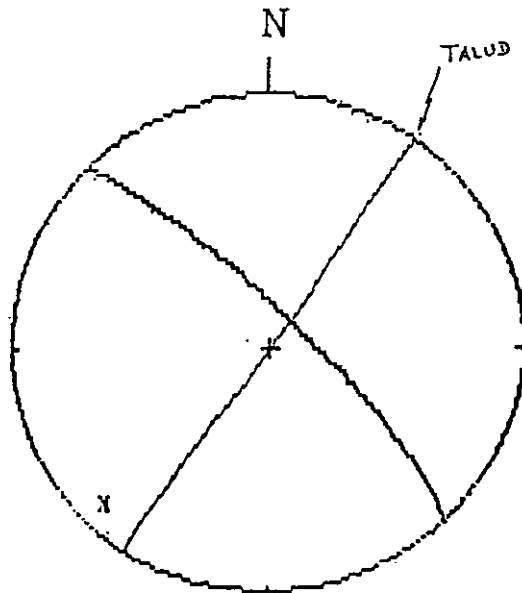
x n = 1

Schmidt net, Lower hemisphere projection

Fig.IV.7 Análisis estructural de la fractura número 6.

FRAC . 2

n = 1



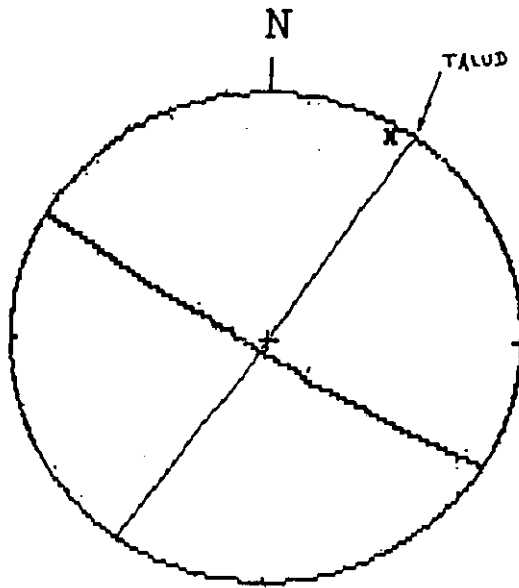
x n = 1

Schmidt net, Lower hemisphere projection

Fig.IV.8 Análisis estructural de la fractura número 2.

FRAC. 3

$$n = 1$$



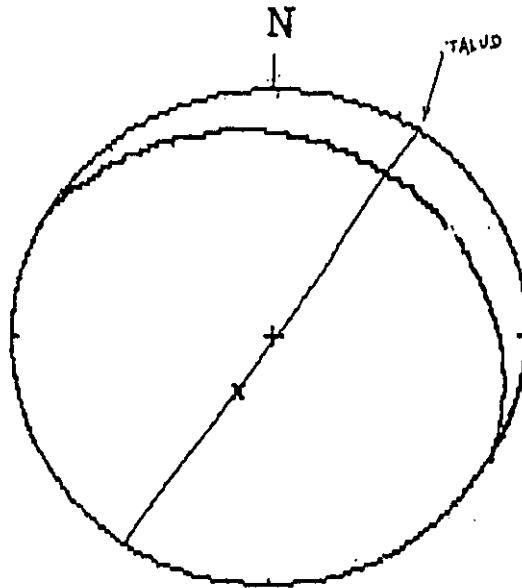
$$x \quad n = 1$$

Schmidt net, Lower hemisphere projection

Fig.IV.9 Análisis estructural de la fractura número 3.

FRAC. 5

$$n = 1$$



$$x \quad n = 1$$

Schmidt net, Lower hemisphere projection

Fig.IV.10 Análisis estructural de la fractura número 5.

IV.2 ESTUDIO GEOFISICO

A continuación se presentan de manera resumida los conceptos y fundamentos de los diferentes métodos geofísicos de exploración que se utilizaron.

• **MÉTODOS GEOELECTRICOS.**

Los métodos eléctricos de campo estacionario, son aquellos en los que el campo eléctrico E no tiene variación con respecto al tiempo.

Los métodos de campo estacionario pueden a su vez dividirse en dos grupos de acuerdo al origen del campo eléctrico. De tal forma que podríamos hablar de métodos de campo natural y de campo artificial.

Los métodos de *campo natural*, son aquellos que se basan en la medición de campos eléctricos que se generan naturalmente por diversos procesos en el interior de la tierra.

Para los métodos de *campo artificial*; se hace uso de un campo eléctrico generado por el explorador. En este caso el campo se genera mediante la aplicación de una corriente continua en el terreno, producida por un generador; e inducida al suelo a través de electrodos conectados con él mismo.

En la práctica con métodos de *campo artificial*, existen dos técnicas principales ampliamente desarrolladas que son: a) El Sondeo Eléctrico Vertical (SEV) y b) El Perfilaje Eléctrico; los cuales tienen una gran variedad de formas de realizarse, dependiendo de la cantidad y forma geométrica en que se coloquen los electrodos al efectuar las mediciones, teniendo en cuenta el objeto que se busca.

a) Método de Sondeo Eléctrico Vertical (SEV).

El objetivo de este método es determinar la distribución espacial de la resistividad de las rocas de los lugares en donde se efectúa el SEV.

Cuando el suelo no se comporta como un semiespacio homogéneo e isotrópico, este se puede considerar como un medio estratificado, es decir; capas horizontales de resistividad constante que son paralelas entre sí.

b) Método de Perfilaje Eléctrico.

Este método también es llamado frecuentemente el método de calicatas eléctricas. El perfilaje eléctrico está dentro de los métodos de campo artificial y a su vez dentro de los métodos de campo estacionario. El objetivo de este método es poder detectar las variaciones de la resistividad eléctrica de los materiales del subsuelo, pero en sentido lateral. Esto significa que la profundidad de investigación se mantiene constante y lo que se busca son cambios en sentido lateral.

Para el problema de detección de cavidades resulta ser un método con muy alta resolución debido a que la presencia de algunas cavidades va a producir variaciones en la resistividad de las rocas que están alrededor de la mina. Si el túnel se encuentra ocupado solamente por aire, la resistividad tenderá a tomar valores sumamente altos (si suponemos que el aire es el dieléctrico perfecto).

Para hacer lo anterior, se cuenta con dos maneras de realizar el trabajo: la primera consiste en desplazar todo el dispositivo de medición a lo largo de todo el perfil, pero manteniendo constantes las separaciones entre electrodos, a este tipo de métodos se les denomina calicatas de dispositivo móvil, la segunda forma de trabajo se realiza manteniendo fijos los electrodos que producen el campo utilizado, es decir; no se cambian durante todo el tiempo que dura el levantamiento, por lo cual se le conoce como método de campo fijo.

Uno de los mejores métodos que mejor resultado dan para los objetivos perseguidos son los de dispositivo móvil.

- **MÉTODOS POTENCIALES.**

Las prospecciones gravimétrica y magnetométrica se encuentran dentro de los métodos indirectos que se realizan para conocer la estructura geológica del subsuelo.

Los métodos potenciales toman su nombre debido al comportamiento físico que presentan. Cuando la intensidad de un campo como lo es el magnético y gravimétrico dependen únicamente de la posición en que se encuentran. Tomando dos propiedades físicas de los cuerpos, la primera referente a la intensidad del campo generado por la atracción de las masas, que se le denomina fuerza de gravedad y la segunda propiedad referida a la intensidad magnética que es generada por las propiedades eléctricas de los átomos de los cuerpos.

La técnica aplicada en este trabajo fue el método de gradientes; donde para el caso gravimétrico se tomaron dos lecturas en el mismo punto con la diferencia de altitud de 0.5 m., en el caso de magnetometría la diferencia de alturas fue de 1.5 m. permitiendo de esta forma hacer perfiles en los que su interpretación se simplifica a señalar las áreas o lugares en donde se encuentran dichas cavernas, todo ello por medio de anomalías gravimétricas y magnetométricas.

Primero se procedió a localizar las áreas de estudio, recopilando toda la información anterior, la geología imperante y el planteamiento del problema, para posteriormente trazar las líneas de trabajo y proyectar el método. Estos levantamientos se realizan en las líneas previamente señaladas, tomando dos valores simultáneos, cada 2 m. y en los trabajos más a detalle se realizó a 1 m. Las diferencias de altura para el método gravimétrico fueron de aproximadamente 0.5 m..

Para el método magnetométrico, la altura fue de 1.5 m. entre sensores. Los resultados obtenidos se van a corrección, para después graficarlos en forma bidimensional, obteniéndose así gráficos o perfiles que posteriormente se interpretarán.

La interpretación se realiza mediante el método del gradiente. Como es sabido los métodos potenciales se interpretan mediante la comparación de los valores observados, con los calculados teóricamente, para cada punto, y esta diferencia es la base de su interpretación.

En el cálculo de los modelos se tomó en cuenta un medio homogéneo indefinido y la anomalía en un punto será la consecuencia de todas las irregularidades que se tengan en el subsuelo.

El modelo teórico y su efecto gravimétrico y/o magnetométrico, resulta un perfil con cierta forma que define una anomalía. Si comparamos la anomalía obtenida en campo, con la anomalía que se calcula, se podrá definir la estructura que provoca dicha anomalía, generándose así la interpretación.

- **MÉTODOS SISMICOS.**

La exploración sismológica es uno de los métodos geofísicos más utilizados en la actualidad.

El método de refracción sísmica se fundamenta en diversas propiedades de la propagación y transmisión del movimiento ondulatorio en los materiales.

La técnica de campo de la refracción sísmica está basada en las trayectorias de tiempo mínimo que emplean las ondas elásticas en propagarse de un punto en la superficie, en donde son generadas; hasta los diferentes horizontes refractores del subsuelo y de éstos hasta otro punto ubicado en la superficie, donde las señales son detectadas por una serie de sensores o geófonos alineados con la fuente de energía.

En su estado actual de desarrollo, la prospección sismológica ofrece excelentes perspectivas para la obtención de parámetros que definan la estructura somera del subsuelo, para localizar cavidades, áreas con material de relleno y para determinar el grado de compactación del terreno.

Los métodos sísmicos terrestres consisten básicamente en generar un movimiento en un punto en el terreno, el cual se propaga en forma ondulatoria en el subsuelo y es registrado a una cierta distancia en detectores llamados geófonos.

La determinación de las estructuras del subsuelo es posible, debido a que la energía generada al transmitirse en el terreno se refleja, refracta y difracta cuando la onda incide en la frontera entre materiales con propiedades físicas contrastantes.

Con el análisis y procesado se determina el número de capas que conforman el subsuelo, sus espesores y velocidades de propagación.

Para el procesado de la información después de realizado el trabajo de campo, se analizaron los sismogramas para obtener un modelo de velocidades y espesores del subsuelo.

IV.2.1 ANALISIS DE LA INFORMACION

A continuación se presenta el análisis de los datos obtenidos de la aplicación de los métodos *geoeléctricos*, en su modalidad *Dipolo-Dipolo*, así como el método de *refracción sísmica* de acuerdo a lo señalado anteriormente (**Fig. IV.1**).

En lo que se refiere al *método geoeléctrico*, se tiene que para la línea 1-1' la cual tiene una longitud de 65 m. localizada a lo largo de la Calle Continuación de Seminario, se puede observar que el comportamiento en resistividad eléctrica presenta valores en el intervalo de 30 y 50 ohm-metro, los cuales se podrían considerar relativamente altos en función del tipo de material presente en el subsuelo. Sin embargo, es también evidente la presencia de una zona de anomalía *geoeléctrica* bastante amplia, en una zona de aproximadamente 25 m. de ancho y que se puede seguir a profundidades de hasta 23 m..

Esta zona de anomalía presenta al menos tres subzonas, probablemente interconectadas; en las cuales la resistividad eléctrica toma valores mayores a los 100 ohm-metro. *La primera* de estas subzonas, se encuentra a una profundidad de 7 m. con una extensión de 4 m., debajo se encuentra *la segunda subzona* la cual se localiza hasta unos 15 m. de profundidad por debajo del punto ubicado a 35 m. del inicio de la línea, *la última subzona*; se presenta como un alto resistivo a una profundidad estimada de 20 a 22 m.. Lo anterior presenta una inclinación aproximada de 50 grados.

Por otra parte, en la línea 2-2' que se localiza a lo largo de la Calle Seminario, con una longitud total de 90 m., a lo largo de la cual se puede observar que la resistividad aparente se encuentra entre los 25 y 40 ohm-metro. Se puede observar la presencia de dos zonas en las que los valores de resistividad no son muy altos, pero que presentan una inclinación de modo muy similar al descrito en la sección anterior, pero en sentidos opuestos.

En la parte central entre esos dos alineamientos se observa una zona de resistividad ligeramente mayor a la del comportamiento general del subsuelo en esta sección. La zona de anomalía se localiza a 21 m. aproximadamente, debajo del punto que se encuentra a 58 m. del inicio de la línea de levantamiento.

En cuanto al *método de refracción* no funcionó en la medida de lo esperado, debido a la presencia de una capa somera de arcilla de alta velocidad superyaciendo a capas menos

consolidadas de baja velocidad, comportándose como una pantalla y predominando las refracciones en la capa de arcilla; que enmascara posibles refracciones de capas más profundas.

Los sismogramas presentan reflejos que provienen de capas abajo de la capa de arcilla, con amplitudes muy variables que no permiten en muchos de los casos la adecuada separación de los eventos, debido a que el equipo utilizado no cuenta con control automático de ganancia, de uso común en los trabajos de reflexión. Se hizo una correlación de los eventos sísmicos en la línea 2 que fue observada en la Calle Continuación de Seminario, sobre los túneles del área minada que fue cartografiada.

Los sismogramas muestran eventos sucesivos con algún traslape que corresponden a los contactos superior e inferior de la capa de arcilla que por su espesor de 1.5 m. y su alta velocidad se identifican con un defasamiento del orden de 3 milisegundos.

Una segunda banda de reflejos corresponde a la capa de arenas cuarcíticas en cuya base fueron explotadas las arenas pumíticas que dieron origen a los túneles de las minas.

En las oquedades se manifiesta un doble reflejo con defasamientos variables, identificándose el primero como la transición de la parte sólida al hueco, y el segundo como la base de la capa de arena y piso de los túneles de la mina, generando un incremento de tiempo de reflejo con respecto a los tiempos promedio que identifican a la base, que se atribuye a una disminución de la velocidad de la onda sísmica al propagarse en el aire contenido dentro de los túneles.

Al hacerse un análisis de las velocidades se encontró que las velocidades del aire (320 m/s) con respecto al material encajonante varía del 20 al 40 % dependiendo de las dimensiones de los huecos y de la posible dispersión de la energía, no disponiéndose al momento de la suficiente información que permita cuantificar la relación entre el volumen de vacíos y el defasamiento del reflejo.

Se observan bandas subsecuentes de reflejos que corresponden a diversas capas más profundas que no es posible identificar, puesto que no se conoce su secuencia estratigráfica.

Tomando como carácter representativo de los reflejos generados por la presencia de huecos, el defasamiento e incremento de tiempo de eventos sísmicos sucesivos, se revisaron los sismogramas obtenidos en las líneas sísmicas observadas para identificar las posibles zonas minadas.

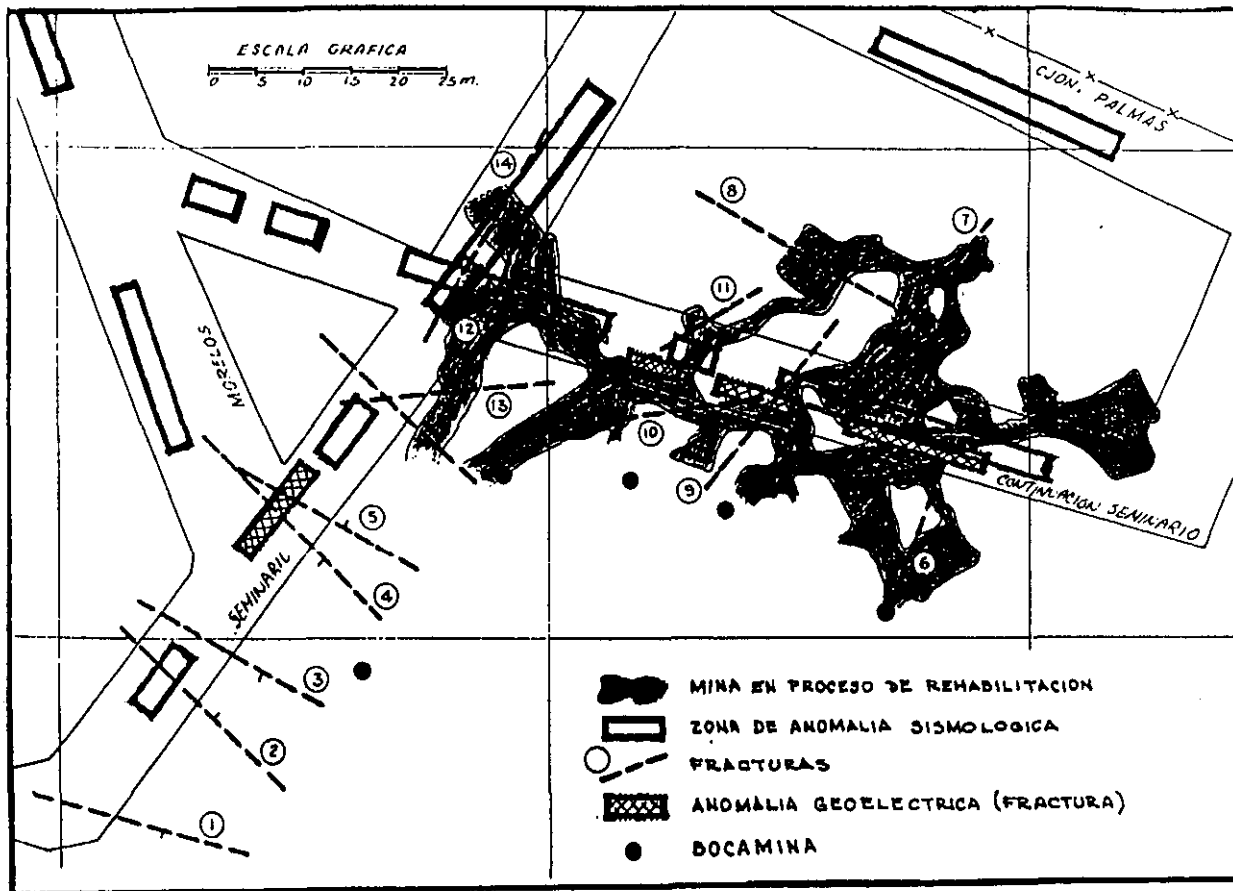


Fig.IV.1 Plano que muestra las anomalías sismológicas y geoelectricas encontradas con los métodos geoelectricos y de refracción sísmica.

IV.2.2 RESULTADOS DEL ESTUDIO GEOFISICO

De acuerdo con lo descrito anteriormente acerca de los métodos aplicados y con el marco geológico de referencia, se puede establecer lo siguiente:

1.- El material observado en la zona de levantamiento presenta resistividades del rango de 25 a 40 ohm-metro, por lo cual se interpretaron como zonas de anomalía aquellas que presentaron valores por arriba de esos valores.

2.- La anomalía detectada en la línea 1-1', que se subdividió en tres partes; probablemente pueda asociarse a la presencia de una cavidad en el subsuelo, que además puede estar en comunicación con posibles fracturas (algunas de estas son observables en superficie).

3.- La parte inferior de la anomalía mencionada en el punto anterior, presenta una forma que puede considerarse característica de una cavidad, sin embargo; la profundidad a la que se encuentra hace ver poco probable esa posibilidad (aunque no descartable).

4.- Respecto a los dos alineamientos de la línea 2-2' se puede correlacionar con las fracturas que se observan en el pavimento de la Calle Seminario. Estos podrían estar formando una estructura tipo graben, interconectada con la posible cavidad.

5.- Si bien los valores de resistividad eléctrica no señalan la presencia de mayores zonas de anomalía, es importante mencionar que esto podría ser ocasionado por contenidos de agua sumamente altos en los materiales en el subsuelo (lo cual parece poco probable de acuerdo a lo observado en las paredes de los cortes).

6.- Se observa la presencia de varias capas sensiblemente paralelas de compacidad variable, y una secuencia de una primera capa de baja velocidad seguida por una capa relativamente delgada de alta velocidad, que superyace a capas de menores velocidades, las cuales se incrementan con la profundidad.

7.- Las velocidades de las capas profundas están distorsionadas por la aceleración que sufren las ondas sísmicas al atravesar la capa de alta velocidad, que se ha identificado como arcillas con arena fina compacta, de acuerdo a la columna estratigráfica medida en el talud de la Calle Seminario.

8.- Los estratos se adelgazan hacia el Poniente de la Calle Seminario aumentando su compactación, lo que sugiere el incremento de velocidades observadas.

9.- Se observan varias zonas con evidencia de oquedades que pueden estar conectadas con la mina identificada, aunque no es posible establecer con seguridad la comunicación entre ellas por no disponerse de información en las áreas cubiertas por construcciones.

10.- Las zonas presentadas como posiblemente minadas, no permiten definir con seguridad la posición de cruce de posibles túneles debido a que la separación entre estaciones

receptoras es de 5 m. y el ancho de los túneles medidos es del orden de 2 m., por lo que existe la posibilidad de que queden ubicados entre estaciones y solo se estará manifestando el área de influencia. Para tener un control confiable es necesario hacer un estudio de reflexión de alta resolución con intervalos del orden de un metro o menores.

11.- El espesor del encape se estima entre los 5 y los 7 m..

Resumiendo, se tiene que los estudios de resistividad geoelectrica proporcionan resultados congruentes con las fracturas identificadas en superficie y dentro de los túneles de la mina bajo la Calle Continuación de Seminario, principalmente en el caso de las fracturas que penetran el subsuelo a profundidades mayores a los 6 m., como es el caso de las fracturas siguientes:

Fractura 4	Alcanza profundidad de 25 m.	Calle Seminario
Fractura 14	Alcanza profundidad de 9 m.	Calle Seminario
Fractura 11	Alcanza profundidad de 11 m.	Calle Continuación de Seminario
Fractura 10	Alcanza profundidad de 15 m.	Calle Continuación de Seminario
Fractura 6	Alcanza profundidad de 25 m.	Calle Continuación de Seminario

Las fracturas que profundizan generan bloques inestables que asociados a zonas debilitadas por la presencia de oquedades, pueden presentar colapsos por efectos de la filtración de líquidos, peso excesivo de las construcciones y vibraciones producidas por el tránsito de equipos pesados.

Conviene destacar las filtraciones observadas dentro de la mina, ubicadas debajo del tramo Noreste de la Calle Seminario y de la parte Central de la manzana, entre las Calles Seminario, Continuación de Seminario y Callejón Palmas que corresponden a la zona fracturada.

De los estudios sismológicos se observa en el análisis de los sismogramas obtenidos que las líneas de refracción revelan una serie de capas sensiblemente paralelas que sobreyacen a una capa resistente con pendiente hacia el Suroeste.

Las capas se adelgazan y aumentan en su compactación conforme se acercan a la parte superior del Cerro Tlayacampa no habiéndose determinado su límite por no disponerse de mayor número de líneas sísmicas.

En las líneas sísmicas observadas se han identificado anomalías en las secuencias de señales sísmicas, con características similares a las obtenidas sobre la zona minada estudiada y que representan evidencias de posibles desarrollos de minas abandonadas, a las cuales no se tuvo acceso por encontrarse las posibles bocaminas dentro de las áreas cubiertas por inmuebles.

IV.3 ESTUDIO MINERO

La existencia de zonas minadas en el Poniente de la Ciudad de México y de algunos Municipios conurbados, es un problema importante debido a que pone en riesgo la estabilidad de los terrenos en esos lugares. En realidad el problema era ya bien conocido desde hace algunos años y ha sido estudiado por dependencias gubernamentales, como la Comisión de Zonas Minadas del Departamento del Distrito Federal.

En muchas de estas áreas se realizó una explotación muy intensa e irregular con técnicas muy rudimentarias, en la mayoría de los casos *no planeadas*; de los materiales pumíticos que tuvieron una gran demanda debido a que eran elementos básicos en las construcciones realizadas en la Ciudad de México entre los años 40's y 50's principalmente.

Con el transcurso del tiempo el problema ha ido creciendo; ya que los materiales del subsuelo y particularmente donde están las antiguas bóvedas y salones de las minas, han tenido un alto grado de intemperismo.

Un punto importante relacionado con el riesgo de las cavidades está en la cantidad y sus características (geometría y distribución). En zonas de explotación a cielo abierto el grado de riesgo estará determinado por la altura y la pendiente del talud así como por el intemperismo que se haya producido en el lugar. En estas zonas se han producido rellenos de material muy irregular (principalmente cascajo y basura que no fueron compactados), que actualmente son habitados y en donde han ocurrido daños a construcciones de diferente magnitud, deslizamientos del terreno y asentamientos diferenciales.

De acuerdo con lo anterior, resulta sumamente importante para poder tomar las medidas tendientes a resolver el problema, el determinar la localización y delimitación de las cavidades en el subsuelo, que puedan afectar las construcciones allí ubicadas y la seguridad de las personas que la habitan.

Es importante mencionar que no existe un método que sea absolutamente confiable para la localización y delimitación de las cavidades, sino que se emplean una serie de métodos y técnicas que generalmente se complementan, con el objeto de dar los mejores resultados posibles.

IV.3.1 METODOS PARA LA DETECCION DE CAVIDADES EN ZONAS MINADAS

Aquí se mencionaran las diferentes técnicas que pueden ser utilizadas para la localización de cavidades en zonas urbanas, para lo cual se han dividido en tres grandes grupos de métodos que son:

1. Métodos Indirectos..

2. *Métodos Semi-Directos.*

3 *Métodos Directos*

Para poder aplicar los métodos que se van a describir, es necesario efectuar un reconocimiento superficial de la zona de estudio, para poder hacer una planeación adecuada de los métodos que habrán de utilizarse.

1. ***Métodos Indirectos***, el empleo de estos métodos para la localización de cavidades en zonas minadas es de gran importancia ya que se aplica en aquellos lugares en donde no existe evidencia superficial de la existencia de tales cavidades, o bien en zonas en que no se puede realizar la exploración directa de las mismas.

Como estos métodos se realizan desde la superficie del terreno y sus resultados se pueden extender a áreas más o menos grandes, es decir; no son puntuales como las perforaciones; se hace un método muy rápido y económico para la investigación.

Dentro de este grupo de métodos están incluidos los MÉTODOS GEOFÍSICOS, de los cuales se presenta más adelante una breve descripción.

Ahora bien, enfocándonos al problema que nos ocupa; al respecto sabemos que para conocer la extensión y posibles ramificaciones de la cavidad minera abandonada que se ubica abajo de las calles Seminario y su Continuación, (*Fotografía No. 7*); así como el espesor del material que la cubre, se llevó a cabo un levantamiento topográfico subterráneo que se apoyó en una poligonal levantada con brújula colgante y cinta que alcanzó un desarrollo lineal de 205.06 m. y dado que la sección transversal es de 4m^2 en promedio, resultó un volumen de 820m^2 más un 10 % por huecos irregulares, teniéndose un volumen total de 900m^3 .

Para evitar que el "techo" de la cavidad minera continuara migrando hacia la superficie, se sugirió que se procediera de inmediato a rellenarla parcialmente mediante la colocación de costales rellenos de tepetate (*Fotografía No. 8*), a reserva de rellenar totalmente los vacíos restantes mediante la inyección de tepetate o concreto pobre por medios neumáticos.

2. ***Métodos Semi-Directos***, por lo que a ellos respecta; se pueden aplicar cuando no se han podido aplicar los métodos directos debido a las condiciones del área estudiada o bien, para apoyar los resultados de tales métodos.

Los métodos semi-directos más comunes consisten en sondeos mecánicos (o perforaciones) efectuadas desde la superficie del terreno, además de las mediciones y observaciones hechas sobre ellas.

Estas perforaciones se realizan en diámetro pequeño y solo refleja la información en un punto, por lo cual solo podremos saber si existe o no una cavidad en tal lugar. Lo anterior implica que mientras más perforaciones se realizan mejor será la investigación de

la zona minada. Obviamente que para diseñar una campaña de perforaciones debe de tenerse información geológica y geofísica que nos permita definir la densidad de sondeos en un área, así como la profundidad mínima necesaria a la cual se presupone la existencia de la cavidad.

3. **Los Métodos Directos** se basan en observaciones y mediciones hechas en el interior de las cavidades, o bien en excavaciones; de manera que pueda penetrar una persona al interior de ésta.

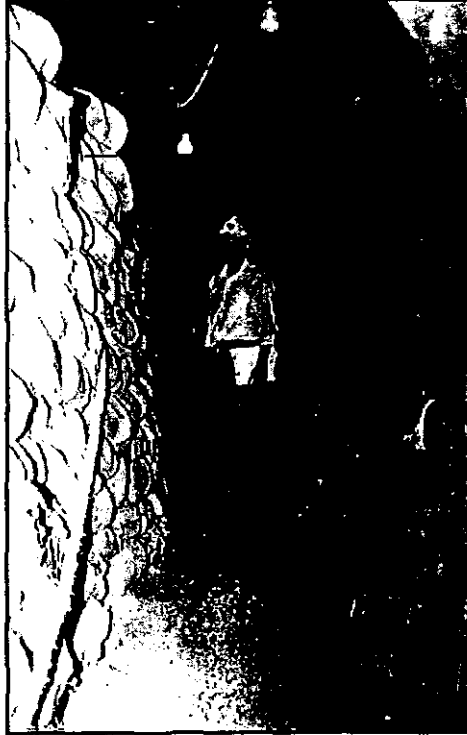
Para la aplicación de estos métodos se hace necesario localizar las bocaminas o accesos a la mina, principalmente en las barrancas, cañadas o cortes; y una vez localizadas, el primero de los métodos será el levantamiento topográfico de la misma, el cual deberá ser lo más preciso posible y estar localizado y referido en la superficie del terreno. Además se deben de analizar algunas características del material explotado para determinar el grado de alteración y fracturamiento de las paredes, piso y techo de la cavidad.

IV.3.2 LEVANTAMIENTO DE TUNELES DE MINAS ANTIGUAS

El levantamiento subterráneo de la cavidad minera abandonada que se ubica abajo de las calles Seminario y Continuación de Seminario en el pueblo de San Rafael-Los Parajes, Municipio de Tlalnepantla de Baz, Estado de México, se llevó a cabo para conocer su extensión y ramificaciones, así como el espesor del material que la cubre y para observar directamente la relación que pudiera tener la migración y derrumbes del techo de la misma con el fracturamiento y hundimiento del terreno que se aprecia en las calles arriba mencionadas y en algunas de las casas habitación contiguas. Como resultado de este trabajo, se obtuvo el plano (*Fig. IV.2*) y la hoja de cálculo (*Tabla 4*). Las coordenadas que aparecen en el plano y hoja, corresponden a las del sistema U.T.M., al cual también está referido el levantamiento topográfico superficial.



Fotografía No. 7 Muestra el interior de una cavidad minera.



Fotografía No. 8 Muestra el relleno parcial de una cavidad minera, mediante costaleras de tepetate.

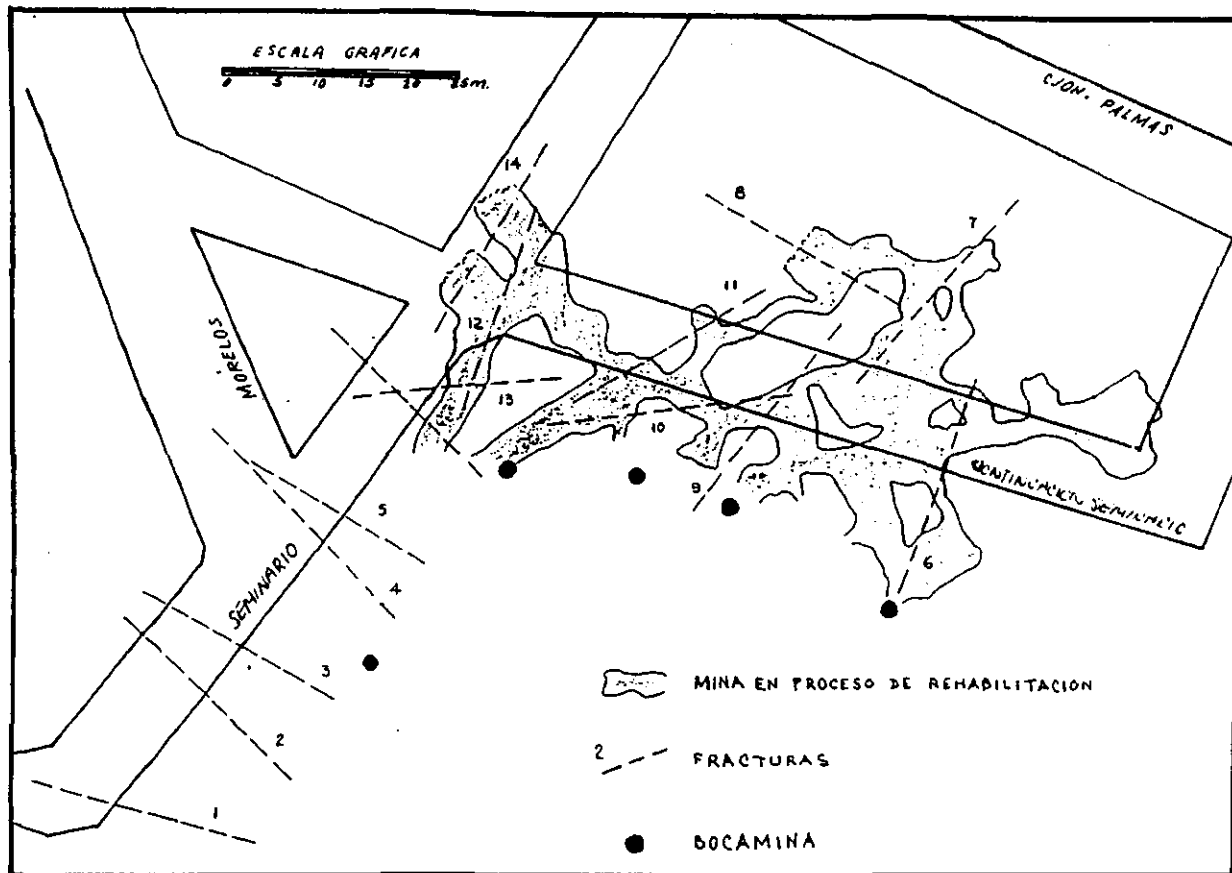


Fig.IV.2 Levantamiento subterráneo en el pueblo de San Rafael-Los Parajes, Municipio de Tlalnepantla de Baz, Estado de México. (Departamento de Explotación de Minas de la Facultad de Ingeniería, U.N.A.M.).

Tabla 4 Hoja de cálculo, levantamiento subterráneo con brújula y Norte astronómico, realizado en el Pueblo de San Rafael-Los Parajes, Tlalnepantla de Baz, Estado de México. (Departamento de Explotación de Minas, Facultad de Ingeniería, U.N.A.M.).

Levantamiento subterráneo con brújula

Cof. Pueblo San Rafael-Los Parajes Tlalnepantla

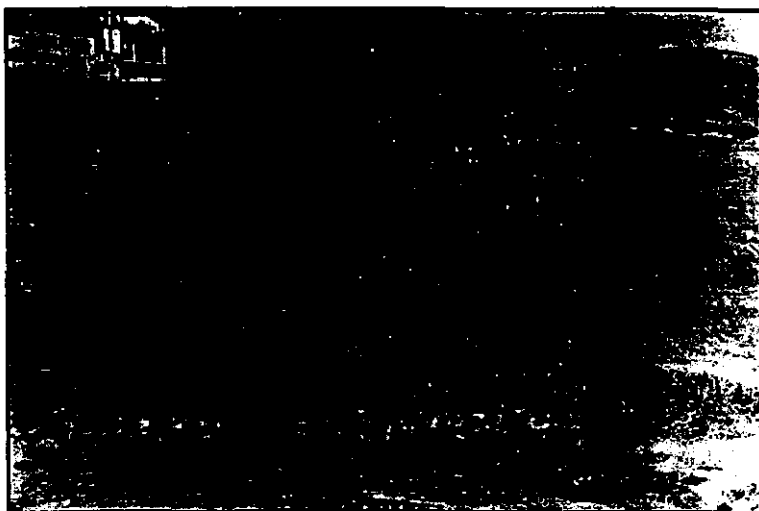
Levantó: Edgar Villarreal.

Calculó y Revisó: Edgar Villarreal

Fecha :25 de Noviembre de 1995

EST	P.V.	AZIMUTH		ANG VERT	DI	EST		P.V.		DH	DV	PTO. APOYO	UNT	X	Y	COORDENADAS		
		a	b			ARRIBA	ABAJO	ARRIBA	ABAJO							E-W	N-S	ELEV
ZEB	Z1	28.00	1	10.17	6.13	0.00	0.00	0.00	1.30	6.03	1.08	ZEB	Z1	2.83	5.33	479,985.218	2,162,652.511	2,242.965
Z1	Z2	302.00	-1	13.67	5.49	0.00	1.30	1.00	0.00	5.33	-1.30	Z1	Z2	-4.52	2.83	479,988.051	2,162,657.838	2,244.047
Z2	Z3	3.00	1	22.50	7.99	1.00	0.00	0.00	1.40	7.38	1.06	Z2	Z3	0.26	7.38	479,983.531	2,162,660.663	2,243.751
Z3	Z4	274.00	-1	8.50	6.93	0.00	1.40	1.10	0.00	6.85	-1.02	Z3	Z4	-6.84	0.18	479,983.789	2,162,668.042	2,245.809
Z4	S1	336.00	1	14.00	8.24	1.10	0.00	0.00	0.40	8.00	1.99	Z4	S1	-6.63	-4.47	479,976.950	2,162,668.520	2,245.885
Z4	Z5	308.00	1	14.00	8.24	1.10	0.00	0.00	1.60	8.00	1.99	Z4	Z5	-6.30	4.92	479,970.322	2,162,664.049	2,246.778
Z5	Z6	247.00	-1	21.00	3.76	0.00	1.60	1.20	0.00	3.51	-1.35	Z5	Z6	-3.23	-1.37	479,976.950	2,162,668.520	2,245.885
Z6	Z7	307.00	1	18.67	5.74	1.20	0.00	0.50	0.50	3.44	1.84	Z6	Z7	-4.34	3.27	479,967.420	2,162,672.072	2,246.632
Z7	Z8	383.00	1	10.00	4.71	0.50	0.50	0.00	1.20	4.64	0.82	Z7	Z8	-4.52	1.04	479,963.076	2,162,675.345	2,247.769
Z8	S2	337.00	1	1.60	9.99	0.00	1.20	0.00	0.50	9.98	0.17	Z8	S2	-8.37	-5.44	479,958.556	2,162,676.389	2,248.087
Z8	Z9	396.00	-1	4.17	5.99	0.00	1.20	0.00	1.50	5.97	-4.43	Z8	Z9	-5.37	2.62	479,950.182	2,162,670.951	2,248.262
Z9	Z10	324.00	-1	1.50	8.89	0.00	1.50	1.00	0.00	8.89	-2.23	Z9	Z10	-5.22	7.19	479,958.556	2,162,676.389	2,248.087
Z10	Z11	330.00	1	13.17	10.19	1.00	0.00	0.00	2.00	9.92	2.32	Z10	Z11	-4.96	6.59	479,950.182	2,162,670.951	2,248.262
Z10	Z12	234.00	1	2.00	8.38	1.00	0.00	0.00	1.50	8.37	0.79	Z10	Z12	-6.77	-4.92	479,958.556	2,162,676.389	2,248.087
Z12	Z13	194.00	-1	6.00	6.85	0.00	1.50	0.00	1.10	6.81	-0.72	Z12	Z13	-1.63	-6.61	479,935.190	2,162,679.006	2,247.652
Z13	S3	305.00	1	5.00	8.00	0.00	1.10	0.40	0.40	7.97	0.70	Z13	S3	-3.37	-7.22	479,943.008	2,162,694.784	2,249.739
Z13	Z18	331.00	-1	3.00	5.91	0.00	1.40	0.60	1.40	5.90	-4.41	Z13	Z18	-4.94	3.21	479,947.966	2,162,686.196	2,248.419
Z18	Z19	171.00	-1	7.50	6.13	0.00	1.40	0.40	1.40	6.08	-0.80	Z18	Z19	0.95	-6.00	479,941.192	2,162,681.275	2,247.711
Z19	Z20	139.00	-1	26.00	5.07	0.40	1.40	1.80	0.00	4.56	-3.32	Z19	Z20	2.99	-3.44	479,941.192	2,162,681.275	2,247.711
Z20	Z1	229.00	1	15.50	6.65	1.80	0.00	0.00	1.80	6.41	1.78	Z20	Z1	-4.84	-4.20	479,939.545	2,162,674.669	2,246.996
Z18	Z21	93.00	1	2.00	8.58	0.60	1.40	0.00	1.70	8.87	0.31	Z18	Z21	8.86	-0.46	479,936.177	2,162,667.446	2,248.093
Z21	Z22	63.00	1	4.50	8.68	0.00	1.70	0.30	1.50	8.65	0.68	Z21	Z22	7.84	1.66	479,933.531	2,162,668.042	2,246.996
Z21	Z18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Z21	Z18	-	-	479,983.789	2,162,668.042	2,246.996
Z18	Z23	337.00	1	24.30	3.48	0.60	1.40	0.00	2.50	3.17	1.44	Z18	Z23	-1.24	2.91	479,983.789	2,162,668.042	2,246.996
Z23	Z24	11.00	1	4.50	10.64	0.00	2.50	0.20	1.50	10.61	0.63	Z23	Z24	2.02	10.41	479,988.733	2,162,671.253	2,247.184
Z24	Z25	313.00	1	6.00	4.49	0.20	1.50	0.30	1.60	4.47	0.47	Z24	Z25	-1.31	4.27	479,988.733	2,162,671.253	2,247.184
Z25	Z26	241.00	1	5.00	6.93	0.30	1.60	0.20	1.50	6.90	0.60	Z25	Z26	-6.78	1.32	479,988.733	2,162,671.253	2,247.184
Z26	Z27	209.00	-1	5.00	6.83	0.20	1.50	0.20	0.60	6.80	-0.60	Z26	Z27	-1.30	-5.95	479,989.684	2,162,665.250	2,246.184
Z27	Z28	232.00	1	1.50	5.07	0.20	0.60	0.00	0.90	5.07	0.13	Z27	Z28	-5.07	0.18	479,992.674	2,162,661.811	2,245.361
Z28	Z29	221.00	-1	4.00	4.59	0.00	0.90	0.30	1.40	4.58	-0.32	Z28	Z29	-3.00	-3.46	479,987.838	2,162,657.607	2,245.338
Z29	Z30	271.00	1	5.00	3.68	0.30	1.40	0.00	1.00	3.67	0.32	Z29	Z30	-1.67	0.06	479,988.733	2,162,671.253	2,247.184
Z30	Z31	207.00	1	23.50	2.65	0.00	1.00	0.60	1.10	2.43	1.06	Z30	Z31	-1.10	-2.17	479,987.838	2,162,657.607	2,245.338
Z31	Z32	223.00	-1	24.00	1.40	0.60	1.10	0.30	1.00	0.82	-1.13	Z31	Z32	-0.56	-0.60	479,988.733	2,162,671.253	2,247.184
Z32	Z7	223.00	-1	26.50	3.33	0.30	1.00	0.50	0.50	2.98	-1.49	Z32	Z7	-2.03	-2.16	479,987.496	2,162,674.168	2,248.027

Para evitar la migración paulatina del "cielo" de la cavidad minera hacia la superficie, se recomendó urgentemente que se rellenara parcialmente: mediante la colocación de ademe de madera (*Fotografía No. 9*) o preferentemente: de costales rellenos de tepetate (*Fotografía No. 10*) a reserva de rellenar totalmente los vacíos restantes mediante la inyección de tepetate o de concreto pobre, por medios neumáticos, con lo cual lograr una buena rehabilitación del terreno, por lo menos en lo que respecta a la cavidad que nos ocupa



Fotografía No.9 Muestra la colocación de ademe de madera en la entrada a la cavidad minera



Fotografía No.10 Muestra el bloqueo a la entrada de una cavidad minera, hecho con costales llenos de tepetate.

V CONCEPTOS BASICOS SOBRE ESTABILIDAD DE TALUDES

V.1 DEFINICION DE TALUD

Se conoce con el nombre genérico de talude a cualquier superficie externa inclinada que forma un ángulo con respecto a la horizontal, que haya de adoptar permanentemente alguna masa o estructura de tierra: bien sea en forma natural (laderas), o en forma artificial (cortes y terraplenes) en donde interviene el hombre. (Fig. V.1).

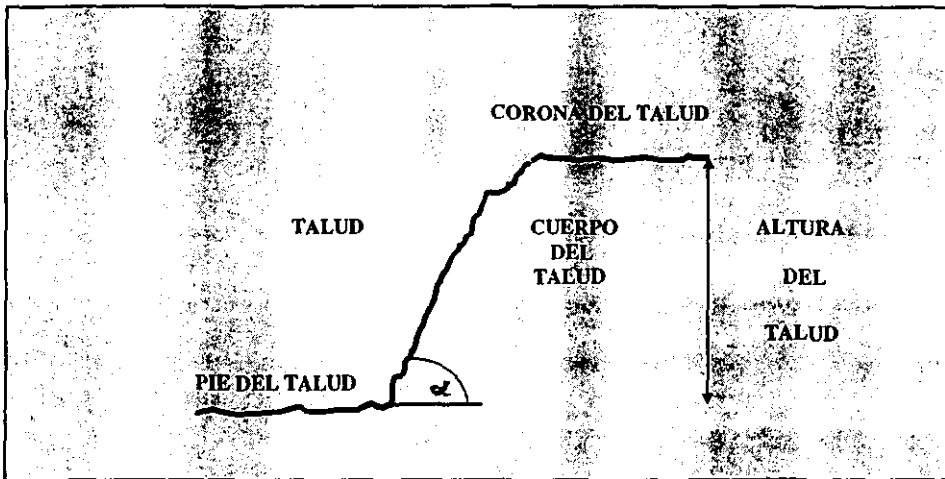


Fig. V.1 . Esquema representativo de un talud que muestra sus elementos principales (Rico, R., Hermilo, C., 1995).

V.2 CLASIFICACION DE LOS TALUDES

La clasificación de los taludes es la una gran herramienta que entre otros; utiliza el profesional para tratar de conocer el comportamiento mecánico de éstos y tomar alguna medida preventiva que garantice la seguridad de tales estructuras.

Algunas clasificaciones pueden ser más útiles que otras, pero cada una tiene éxito en su propósito de satisfacer las necesidades del profesional.

La clasificación de los taludes está hecha con base en la génesis de formación de los mismos. Se tiene por lo tanto; que los taludes pueden ser de dos tipos a saber :

- Taludes Naturales y
- Taludes Artificiales.

V.2.1 TALUDES NATURALES

Cuando el talud se produce en forma natural, sin intervención humana; se denomina ladera natural o simplemente ladera.

Aunque esta no es la única nomenclatura usada por los Ingenieros de las Vías Terrestres, pues por lo menos existe otra en la cual se denominan "laderas naturales" o simplemente "laderas"; a las superficies inclinadas de las masas de suelo que se han formado sin intervención humana, reservando la palabra "Talud" para la formación artificial construida por el Ingeniero.

No obstante lo anterior, la nomenclatura no constituye naturalmente un aspecto esencial y es fácil lograr el entendimiento inmediato a este respecto aún entre Ingenieros de diferentes nacionalidades dentro del idioma español.

V.2.2 TALUDES ARTIFICIALES

Los taludes artificiales a diferencia de los anteriores; son aquellos que construye el Ingeniero.

Dentro de estos se encuentran :

- *Los cortes:* Son aquellos que se producen al realizar alguna excavación en una formación térrica natural
- *Los taludes de excavación:* Son aquellos taludes que son el resultado de excavaciones que se realizan a partir del nivel del terreno natural.
- *Los taludes artificiales:* Son aquellos lados inclinados de los terraplenes.

Es importante señalar que los taludes artificiales; deberán cumplir con dos condiciones importantes:

1.- Mínima Excavación

2.- Máxima Seguridad

Hablar de *mínima excavación* implica *ahorro* de recursos económicos durante el proyecto, aunque es bien cierto que no se puede hablar de dicho *ahorro* si no se tiene la certeza de que el talud construido genere a la vez la *máxima seguridad* posible.

La *mínima excavación* aparecerá cuando la inclinación apropiada sea la más escarpada posible; que se sostenga el tiempo necesario sin caerse. Aquí radica la esencia del problema y la razón de su estudio.

A diferentes inclinaciones del talud corresponden diferentes masas de material *térreo por mover* y, por lo tanto; *diferentes costos*. Podrían imaginarse casos, en los que por alguna razón; el talud más conveniente fuese muy tendido y en tal caso no habría motivo para pensar en "problemas de estabilidad de taludes", pero lo normal es que cualquier talud funcione en forma satisfactoria desde todos los puntos de vista, excepto el económico, de manera que las consideraciones de costo presiden la selección del idóneo, que resultará ser aquel al que corresponda la mínima masa de tierra movida, o lo que es lo mismo; el talud más escarpado.

V.3 DEFINICION DE ESTABILIDAD E INESTABILIDAD DE TALUDES

Definición. La seguridad de una masa de tierra contra falla o movimiento; es a lo que se define como *estabilidad* y debe considerarse no solo en el proyecto de estructuras de tierra, sino también en la reparación y corrección de los que han fracasado.

Cuando ocurren estos fracasos, ya sea deslizamientos, corrimientos o hundimientos es necesario hacer estudios de estabilidad para determinar la causa de la falla y poder *indicar su corrección y el mejor método para prevenir dificultades futuras*.

Los problemas relacionados con la estabilidad de laderas naturales difieren radicalmente de los que se presentan en taludes construidos por el Ingeniero. Dentro de éstos deben verse como esencialmente distintos los problemas de los cortes y los de los terraplenes.

Las diferencias importantes radican, en primer lugar en la naturaleza de los materiales involucrados y, en segundo; todo un conjunto de circunstancias que dependen de cómo se formó el talud y de su historia geológica, de las condiciones climáticas que privaron a lo largo de tal historia y de la influencia que el hombre ejerce en la actualidad o haya ejercido en el pasado.

Esta historia y génesis de formación de laderas y taludes, la historia de esfuerzos a que estuvieron sometidos y la influencia de condiciones climáticas o, en general ambientales; definen aspectos tan importantes como la configuración de los suelos y las rocas o el flujo de aguas subterráneas a través de los suelos que forman la ladera o el talud, el cual influye decisivamente en sus condiciones de estabilidad.

Así pues, habrá que distinguir en primer lugar en lo que a tratamiento y manejo se refiere, las laderas naturales de los taludes artificiales. Los materiales que constituyen ambos tipos son diferentes en naturaleza y disposición y también cambia en esencia el

modo en que influyen todas las circunstancias de ambiente, clima e historia geológica desde su formación y durante su existencia. Será necesario distinguir ambos casos; para ir formando el conjunto de conocimientos teóricos y experimentales idóneo para cada uno.

El Ingeniero como es usual analizará éstos problemas tratando de extraer los suficientes conocimientos de carácter general como para poder establecer un buen modelo matemático que resuelva el problema de estabilidad del talud.

Definición. La *inestabilidad* es aquella que se produce como resultado de la falla por esfuerzo cortante en una serie de puntos que definen una superficie a lo largo de la cual se produce el movimiento.

Realmente; cualquier factor que produzca una disminución de la resistencia del suelo o un aumento de los esfuerzos en el suelo; contribuye a la inestabilidad y deben tomarse en consideración tanto en el proyecto de las estructuras de tierra como en la corrección de fallas.

V.4 FACTORES IMPORTANTES DE ANALISIS EN LA ESTABILIDAD DE TALUDES

El término *estabilidad de talud* (seguridad de una masa de tierra contra falla o movimiento) involucra dos factores importantes de análisis:

1. Diseño de taludes y
2. Estudio de la estabilidad de taludes existentes.

V.4.1 DISEÑO DE TALUDES

Para el buen diseño de un talud, será necesario hacer observaciones de campo como: sondeos, pruebas de laboratorio, cálculos de estabilidad, uso de gráficas y estudios detallados de Geología, Geofísica y Geotecnia.

El estudio Geológico deberá basarse entre otros aspectos en :

- Cartografía
- Fotogeología
- Litología
- Estratigrafía
- Discontinuidades
- Sistemas de fracturamiento y
- Geología Estructural.

El análisis Geofísico por su parte: se basará esencialmente en la medición e interpretación de ciertas propiedades físicas de las rocas como son: densidad, porosidad, conductividad, resistencia a los esfuerzos, etc., con el objeto de inferir a través de este método indirecto la detección de cavidades y posibles áreas inestables en zonas minadas. Siendo los métodos eléctricos y sísmicos de refracción los de mayor resolución para este tipo de problemas.

Por último el estudio Geotécnico, revisará aspectos tales como:

- Propiedades mecánicas de la roca o del material
- Levantamientos topográficos
- Condiciones de agua del subsuelo y
- Tipo de cargas actuantes.

El buen manejo e interpretación de la información y los resultados obtenidos, aunados a la experiencia en campo con que cuente el Ingeniero, lo llevarán a definir con claridad; la geometría del talud que se está diseñando y a establecer las precauciones y medidas de seguridad pertinentes para que este permanezca estable durante su vida útil.

Es recomendable que la inclinación que adopte el talud diseñado sea la más escarpada posible (sin llegar al colapso), con el propósito de hacer una *mínima excavación* y a la vez tener una *máxima seguridad* acompañada de un ahorro económico significativo en el presupuesto total de la obra.

V.4.2 ESTUDIO DE LA ESTABILIDAD DE TALUDES EXISTENTES

Para el estudio de la estabilidad de taludes ya existentes, es necesario hacer uso de métodos de cálculo de estabilidad de taludes (valga la redundancia) tales como: el Método Sueco, y el Método de Taylor; entre otros de suma importancia.

Estos métodos combinados con la información Geológica, Geofísica y Geotécnica más reciente que se tenga del terreno, ayudarán a asimilar mejor el comportamiento mecánico del talud, pudiendo así establecer las soluciones más viables a seguir para mantenerlo estable o estabilizarlo en caso de ser necesario.

En nuestro caso particular se aplicó el método de las dovelas para el análisis de la estabilidad del talud ubicado en la zona conocida como "El Cantil".

V.5 ANTECEDENTES HISTORICOS DE LOS METODOS DE ANALISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES

En el campo del estudio de los taludes, existen pioneros de labor muy meritoria. Collin 1845, (en "La ingeniería de suelos en las vías terrestres, Rico, R.A.) habló por vez primera de superficies de deslizamiento curvas en las fallas de los taludes e imaginó

mecanismos de falla que no difieren mucho de los que actualmente se consideran en muchos métodos prácticos de diseño.

Desgraciadamente sus ideas; obtenidas de una observación muy objetiva de la realidad, se vieron obstaculizadas por opiniones anteriores y contrarias de Ch. A. Coulomb quien preconizó la falla plana de los taludes, hipótesis mucho menos fecunda; según se demostró en el desarrollo posterior del campo y vio impuestas sus ideas quizá por el hecho de su mayor prestigio y autoridad.

Las ideas de superficies de deslizamiento no plano fueron resucitadas en Suecia; por Petterson 1916, (en "La ingeniería de suelos en las vías terrestres, Rico, R.A.); quien al analizar una falla ocurrida en el puerto de Gottemburgo dedujo que la ruptura había ocurrido en una superficie curva y fueron impulsados principalmente por W. Fellenius 1927, (en "La ingeniería de suelos en las vías terrestres, Rico, R.A.); uno de los investigadores más importantes del campo de los taludes.

La escuela Sueca propuso asimilar la superficie de falla real a una cilíndrica cuya traza con el plano del papel sea un arco de circunferencia; con esto se busca sobre todo facilidad en los cálculos, pues desde un principio se reconoció que la llamada falla circular no representa exactamente el mecanismo real.

Actualmente reciben el nombre genérico de Método Sueco aquellos procedimientos de cálculo de estabilidad de taludes en que se utiliza la hipótesis de falla circular.

En 1935, Rendulio propuso la espiral logarítmica como trazo de una superficie de deslizamiento más real, pero Taylor 1937, (en "La ingeniería de suelos en las vías terrestres, Rico, R.A.) puso de manifiesto que ésta curva; que complica bastante los cálculos, proporciona resultados bastante similares a la circunferencia, que su uso práctico probablemente no se justifica.

V.5.1 PROPOSITO DE LOS CALCULOS DE ESTABILIDAD

En la práctica, los cálculos de estabilidad sirven para volver a proyectar taludes que se han derrumbado, o bien para determinar antes de iniciar la obra; los ángulos del talud adecuados a los requerimientos de seguridad especificados.

Durante la construcción, suelen a veces producirse roturas locales de los taludes de desmontes o de terraplenes. Dichas roturas indican que el valor medio de la resistencia mínima al corte ha sido sobrestimado y, como constituyen en realidad ensayos de corte en gran escala, ofrecen una oportunidad excelente para valorar la resistencia mínima real, y evitar nuevos accidentes en la obra cambiando el proyecto en función de los nuevos datos.

El procedimiento a seguir consiste en determinar, por medio de perforaciones o excavaciones; la posición de la superficie de deslizamiento, computar los pesos de las distintas partes de la masa que tendió a producir o a oponerse al deslizamiento y calcular la resistencia media al corte del suelo que resulta necesaria para satisfacer las condiciones de equilibrio.

Cuando se debe calcular un talud en una región donde no se han producido deslizamientos, es necesario estimar o determinar la resistencia al corte medio del suelo antes de iniciar la construcción. Una vez fijada la resistencia media al corte, el ángulo del talud puede determinarse por teoría en forma que satisfaga la seguridad requerida. Resulta obvio que éste método solo es utilizable en los casos en que las condiciones del suelo permitan determinar la resistencia media al corte del suelo con cierta exactitud por medio de ensayos adecuados.

V.5.2 COMENTARIOS ACERCA DE LOS METODOS DE CALCULO.

No existe un método general de análisis aplicable a todos los taludes. Los métodos de cálculo para definir la estabilidad de los taludes, son métodos de análisis límite en los que, como primera etapa; se establece un mecanismo cinemático de falla; extraído naturalmente de la experiencia, con base en el cual se analizan las fuerzas tendientes a producirlas (fuerzas motoras), las cuales se han de comparar por algún procedimiento con las fuerzas capaces de desarrollarse y que tiendan a que el mecanismo de falla no se produzca (fuerzas resistentes).

Así pues, todos los métodos de cálculo en boga están ligados a un mecanismo cinemático de falla específico, por lo que solo serán aplicables a aquellos problemas de estabilidad en que la falla sea del tipo que se considera.

Además de lo anterior, existe otra razón por la cual no puede contarse con un método general de análisis aplicable a todos los casos; de hecho; por esta razón habrá muchos casos prácticos de estabilidad de taludes a los que en buena ley no sea aplicable ningún método teórico de análisis. En efecto, la aplicación de cualquier método teórico de análisis implica que se puedan utilizar los parámetros de resistencia del suelo adecuados al caso.

A su vez; el poder hablar de lo anterior implica un requisito mínimo en lo que se refiere a la naturaleza de los materiales constitutivos y su disposición, de manera que pueda hablarse de homogeneidad o de una estratificación bien conocida y bien definida.

Esta condición suele cumplirse en los terraplenes de las Vías Terrestres, como consecuencia del ejercicio de la capacidad de selección de materiales del que se ha hablado, pero muchas veces no se satisface en los cortes y en las laderas naturales, debido a la anarquía (por lo menos aparente) con que se disponen los materiales y a las variaciones que en ellos ocurren en corto trecho. Si se combina esto con la imposibilidad que se tiene de

realizar una exploración de gran detalle en todo corte o ladera que interese a la Vía Terrestre, se llega a la conclusión de que en una buena parte de los cortes y las laderas reales será imposible aplicar racionalmente un método matemático de cálculo que sea representativo del problema en estudio.

Desde luego que habrá casos en que por su especial importancia, conjugada con condiciones razonables de homogeneidad; convendrá realizar las necesarias exploraciones, muestreo y pruebas de laboratorio que permitan definir los parámetros de resistencia para aplicar el método de análisis teórico que sea apropiado, pero sigue en pie el hecho de que es prácticamente imposible el conocimiento de las propiedades mecánicas de los suelos en detalle en cada punto de la Vía Terrestre, por lo menos con el grado de aproximación suficiente como para permitir un proyecto basado en métodos teóricos en cada corte o terraplén.

Es preciso hacer una distinción de importancia. Mientras los problemas teóricos de estabilidad de los taludes distan mucho de estar resueltos y constituyen un reto para los investigadores de la Mecánica de Suelos, los aspectos prácticos del problema están mejor definidos, hoy se construyen taludes muy importantes con factores de seguridad muy bajos, lo cual es indicativo de que los métodos actuales, si bien poco significativos teóricamente, funcionan bastante bien en la práctica, al grado de que cuando tales métodos se han aplicado cuidadosamente tras haber investigado correctamente las propiedades de los suelos, la posibilidad de una falla de consecuencias ha demostrado ser realmente muy pequeña.

V.5.3 METODO DE LAS DOVELAS

Basándose en las observaciones de la Comisión Geotécnica Sueca, acerca de las fallas aparecidas en los ferrocarriles de esa nación, K. E. Petterson propuso un método de cálculo de taludes que fue perfeccionado posteriormente por Fellenius (Método de las Dovelas -1927-).

De todos los procedimientos de aplicación del Método Sueco a este tipo de suelos, posiblemente el más popular y expedito sea el de las dovelas, en el cual se comprenden todos los procedimientos de análisis de estabilidad respecto a la falla por rotación, en los que se considera que la superficie de falla es un cilindro, cuya traza con el plano en el que se calcula es un arco de circunferencia.

La zona de falla o masa deslizante se divide en planos verticales como lo muestra la *Fig. V.2* obteniéndose así una serie de dovelas.

El número de ellas es, hasta cierto punto cuestión de elección, si bien; a mayor número, los resultados del análisis se hacen más confiables.

No es necesario que todas las dovelas tengan el mismo ancho y para facilitar los cálculos se hace que sus límites coincidan con las intersecciones de la circunferencia, con los estratos del suelo por abajo y con el paramento del talud por arriba.

Al hacer el análisis se considera que cada dovela actúa independientemente de las colindantes: no se desarrolla esfuerzo cortante entre ellas y las presiones normales en cada lado de la dovela producidas por las colindantes son iguales.

En la Fig. V.3 se muestra la superficie de deslizamiento circular con centro O y radio R. La presencia de agua a la izquierda y derecha de la sección producen momentos, tomando como referencia el centro O, $A_L a_L$ y $A_r a_r$ respectivamente.

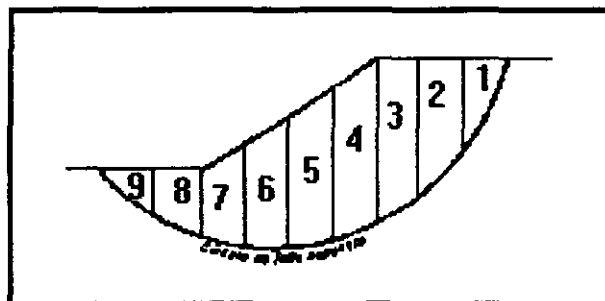


Fig. V.2 Método de las dovelas o de Fellenius. (Juárez, B. y Rico, R., 1989).

El método asume que es nula la resultante de las fuerzas Q_L y Q_r en IJ y KL respectivamente, debido a que son coincidentes, iguales y además opuestas y paralelas a la base de la porción JK.

Descomponiendo la fuerza W , tenemos :

$$P = W \cos \alpha$$

$$T = W \sin \alpha$$

Si la presión de poro promedio a lo largo de IJ es U , entonces la fuerza efectiva a lo largo de JK, que produce una resistencia friccionante es :

$$P' = (W \cos \alpha - ub \sec \alpha)$$

Esta fuerza puede producir una resistencia al corte máximo cuando ocurre la falla, igual a :

$$S_{max} = c' b \sec \alpha + (W \cos \alpha - ub \sec \alpha) \tan \phi'$$

La suma de los momentos actuantes y resistentes para todas las dovelas son :

$$M_d = \sum (R W \text{ sen } \alpha) + A_r a_r - A_l a_l$$

$$M_{r_{\max}} = \sum [c' b \text{ sec } \alpha + (W \text{ cos } \alpha - u b \text{ sec } \alpha) \tan \phi']$$

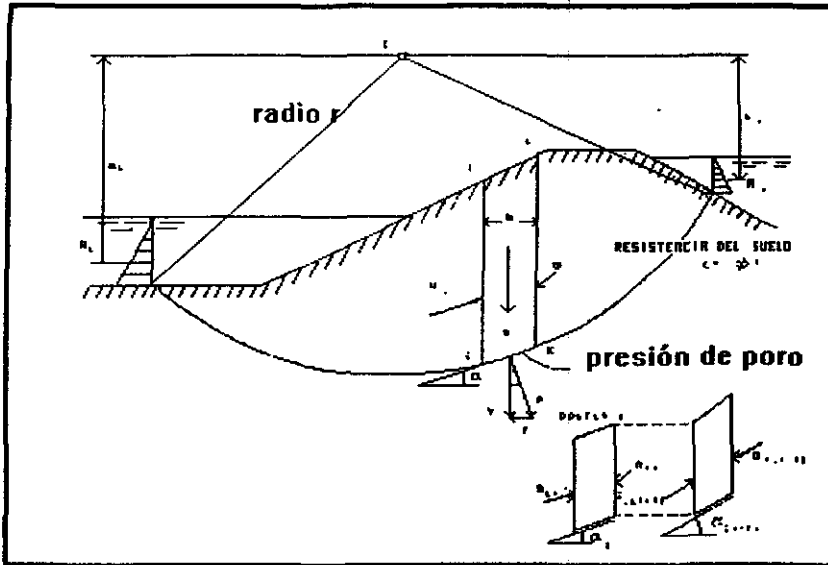


Fig. V.3 Superficie de deslizamiento circular. Método Sueco. (Escobar, C., 1996).

Por lo tanto el factor de seguridad para éste caso se expresa como :

$$FS = \frac{\sum [c' b \text{ sec } \alpha + (W \text{ cos } \alpha - u b \text{ sec } \alpha) \tan \phi']}{\sum (R W \text{ sen } \alpha) + A_r a_r - A_l a_l}$$

Una alternativa define al factor de seguridad como la magnitud de la resistencia al esfuerzo cortante promedio, a lo largo de JK el cual puede ser movilizado por la fuerza P' . En éste caso queda :

$$M_{r_{\text{mob}}} = \sum R [(c' / P) b \text{ sec } \alpha + (W \text{ cos } \alpha - u b \text{ sec } \alpha) \tan \phi' / F]$$

y en el equilibrio al límite $M_{r_{\text{mob}}} = M_d$

V.6 DEFINICION DEL FACTOR DE SEGURIDAD

Muchas críticas se han levantado en el pasado con respecto al uso inapropiado de los factores de seguridad y de las definiciones incompletas que han sido dadas en varias ocasiones para dichos factores.

Sin embargo cualquier análisis cuantitativo de estabilidad deberá hacer uso de algún grado de seguridad .

Entendamos pues al *factor de seguridad* como la relación existente entre las fuerzas o momentos resistentes y las fuerzas o momentos actuantes :

$$FS = FR / FS \quad \text{o} \quad FS = MR / MS$$

Donde:

FS es el factor de seguridad.

FR es la fuerza resistente.

FS es la fuerza actuante.

MR es el momento resistente.

MS es el momento actuante.

Sin olvidar que dicho factor calculado por cualquiera de los métodos de análisis será único para el talud en cuestión durante su vida útil; siempre y cuando las condiciones iniciales, bajo las cuales se inició el estudio permanezcan constantes. De no ser así; es probable que el talud se inestabilize, siendo necesario un nuevo cálculo del factor de seguridad, en base a las nuevas condiciones imperantes en él.

Por ejemplo; el significado de los factores de seguridad para una presa es mostrado en la siguiente tabla.

Tabla 5 Significado de los factores de seguridad (George B. Sowers, 1994).

FACTOR DE SEGURIDAD	SIGNIFICADO
Menor que 1.0	Inseguro
Entre 1.0 y 1.1	Seguridad dudosa
Entre 1.1 y 1.2	Satisfactorio para cortes y taludes pero dudoso para presas
Mayor que 1.2	Seguro para presas

Debe observarse que el factor de seguridad calculado para cierto talud, varía según el método de análisis utilizado. Por ejemplo, el " método ordinario de las dovelas " proporciona comúnmente valores de un 10% a un 15% menores a los obtenidos con métodos más precisos y en algunos casos el error puede alcanzar hasta el 60% (Lambe y Whitman, 1959).

Usando el análisis elástico para examinar la distribución de esfuerzos en un terraplén no colapsado, Bishop (1952) demostró que la resistencia al esfuerzo cortante a lo largo de una superficie de deslizamiento circular en un talud, no es la misma.

Es importante apreciar que el factor de seguridad obtenido en un talud, es únicamente el valor promedio de todos los encontrados a lo largo de la superficie de deslizamiento.

El factor de seguridad FS obtenido de un análisis de estabilidad dado, asume que la constante $1/FS$ al afectar la resistencia al esfuerzo cortante, determina el esfuerzo cortante requerido en la superficie de deslizamiento para resistir el esfuerzo cortante producido por las cargas externas.

V.7 CAUSAS QUE PRODUCEN MOVIMIENTOS DE LAS MASAS DE TIERRA

Las fallas de las masas de tierra tienen una característica en común: hay un movimiento de una gran masa de suelo a lo largo de una superficie más o menos definida (curva o plana). En la mayoría de los casos la masa de tierra permanece intacta durante las primeras etapas del movimiento, pero finalmente se deforma y rompe en pedazos; a medida que el movimiento progresa, (*Fig. V.4*).

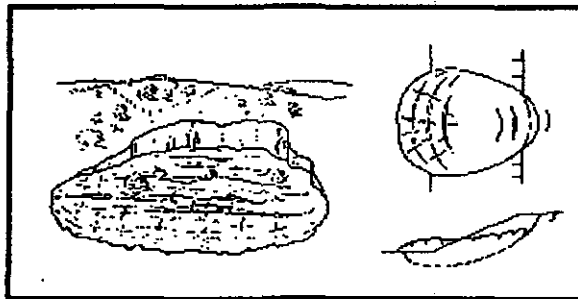


Fig. V.4 Falla de una masa de tierra por deslizamiento. (George, B., Sowers, 1994).

El movimiento ocurrirá cuando la resistencia al esfuerzo cortante del suelo sea excedida por los esfuerzos cortantes que se producen en una superficie relativamente continua.

Es difícil determinar las causas de muchos movimientos de masas de tierra. Realmente cualquier cosa que produzca una disminución de la resistencia del suelo o de un

aumento de los esfuerzos en el suelo, contribuirá a la inestabilidad y será necesario tomarlo en consideración tanto en el proyecto de las estructuras de tierra como en la corrección de las fallas.

La **Tabla 6** muestra algunas de las causas que producen movimiento de una masa de tierra.

Tabla 6 Causas que producen movimientos de una masa de tierra. (George, B., Sowers, 1994).

Causa	Descripción	Efecto
1. Carga	Incremento de la carga sobre el talud.	Disminución de la estabilidad.
2. Agua	Presencia de agua en el talud.	Disminución de la estabilidad.
3. Vibración	Presencia de vibración en el talud.	Disminución de la estabilidad.
4. Corte	Presencia de corte en el talud.	Disminución de la estabilidad.
5. Erosión	Presencia de erosión en el talud.	Disminución de la estabilidad.
6. Desplazamiento	Presencia de desplazamiento en el talud.	Disminución de la estabilidad.
7. Temperatura	Presencia de temperatura en el talud.	Disminución de la estabilidad.
8. Humedad	Presencia de humedad en el talud.	Disminución de la estabilidad.
9. Presión	Presencia de presión en el talud.	Disminución de la estabilidad.
10. Tensión	Presencia de tensión en el talud.	Disminución de la estabilidad.

V.8 EL CONCEPTO DE FALLA

Un aspecto que genera confusión dentro de la concepción del problema " estabilidad de taludes ", es el que emana de la extraordinaria complejidad y multiplicidad de lo que ha dado en llamarse " falla de talud ".

Desde luego, no existe un consenso universal en lo que debe entenderse por tal; la gran mayoría de las fallas de taludes se definen en términos de derrumbes o colapsos de toda índole, que no dejan duda al pensar que ha ocurrido algo que pone en serios problemas a la función estructural, o en términos de movimientos excesivos al grado de ser incompatibles con la concepción ingenieril del comportamiento del talud y con la función para la cual fue construido.

Así pues, la verdadera fuente de confusión en el concepto " falla de talud ", es la gran variedad de fenómenos que generalmente se involucran en el concepto.

V.8.1 FALLAS EN TALUDES NATURALES

No es fácil diferenciar todos los tipos de fallas de taludes merecedoras de ser recordadas por los Ingenieros de amplia experiencia en el tema; más difícil puede ser aún el intento de clasificar racionalmente tales fallas.

Dicha tarea se intentará en las siguientes líneas, pero es seguro que el ensayo de agrupación a que se llegue resultará incompleto a los ojos de muchos especialistas, quienes deberán completarlo con su propio criterio y en base a su amplia experiencia, pues para los fines de este trabajo la clasificación que aquí se dé será suficiente.

V.8.1.1 CREEP

Se refiere a ésta falla, el proceso más o menos continuo y por lo general lento de deslizamiento ladera abajo que se presenta en la zona superficial de algunas laderas naturales.

El creep suele afectar a grandes áreas y el movimiento superficial se produce sin una transición brusca entre la parte superficial móvil y las masas inmóviles más profundas. No se puede hablar de una superficie de deslizamiento, (*Figs. V.5 y V.6*).

El creep suele deberse a una combinación de las acciones de las fuerzas de gravedad y otros varios agentes.

La velocidad de movimiento ladera abajo de un creep típico puede ser muy baja y rara vez excede de algunos centímetros por año .



Fig. V.5 Creep en una ladera natural. (Rico, R., y Hermilo, C., 1995).



Fig. V.6 Vista de una ladera natural en creep, próxima a la carretera Huixtla-Motuzintla. (Rico, R., y Hermilo, C., 1995).

En rigor debe hablarse de dos clases de creep, según lo ha señalado Terzagui, a saber tendremos :

- 1) *Creep Estacional.*
- 2) *Creep Masivo.*

1) Creep Estacional. Este tipo de creep afecta solo a la corteza superficial de la ladera que sufre la influencia de los cambios climáticos en forma de expansiones y contracciones térmicas o por humedecimiento y secado.

Este tipo de creep producirá movimientos que podrán variar con la época del año. El espesor de la capa superficial a la que afecta es sumamente baja y su dimensión máxima puede estimarse en un metro.

2) Creep Masivo. Este tipo de creep afecta a capas de tierra más profundas, no influenciadas por los efectos ambientales; y que en consecuencia, solo se puede atribuir al efecto gravitacional.

El creep masivo se manifestará por movimientos prácticamente constantes. Es lógico pensar que la velocidad de movimiento de la ladera sea máxima en la superficie y vaya disminuyendo hacia el interior, donde aumentan las restricciones al movimiento. Este hecho, del que existe amplia evidencia experimental, se refleja por una inclinación de los árboles, postes y otros elementos similares, los que adoptan una posición perpendicular a la ladera en vez de la natural vertical, (*Fig. V.7*).



Fig. V.7 Signos de creep en una ladera natural. (Rico, R., y Hermilo, C., 1995).

Además es obvio que han de reflejarse en el movimiento todas las heterogeneidades que existan en la zona superficial de la ladera, las cuales crearán diferencias en la velocidad del movimiento que a su vez, serán causa de agrietamientos, escalonamientos, rotura de marcos, de bardas y de cualesquiera estructuras longitudinales que puedan existir.

V.8.1.2 FLUJOS

Se refiere éste tipo de falla a movimientos más o menos rápidos de una parte de la ladera natural, de tal manera que el movimiento en sí y la distribución aparente de velocidades y desplazamientos recuerda el comportamiento de un fluido viscoso.

La superficie de deslizamiento o no es distinguible o se desarrolla durante un lapso relativamente breve; es también frecuente que la zona de contacto entre la parte móvil y las masas fijas de la ladera; sea una zona de flujo plástico.

El material susceptible de fluir puede ser cualquier formación no consolidada y así el fenómeno puede presentarse en fragmentos de roca, depósitos de talud, suelos granulares finos o arcillas francas, son frecuentes los flujos de lodo.

Así pues los flujos se dividirán en dos grupos, según resulte preponderante o no en su generación; el agua contenida por los materiales envueltos en el fenómeno. Distinguiéndose el *flujo en materiales relativamente secos*, o *en materiales húmedos* y en casos extremos *el flujo de lodos*.

1. Flujo en materiales relativamente secos.

En este grupo quedan comprendidos en primer lugar, los flujos de fragmentos de roca, desde los muy rápidos (avalanchas), hasta los que ocurren muy lentamente. Estos movimientos pueden explicarse en términos de la falla plástica de los contactos profundos entre los fragmentos de roca y, consecuentemente; afectan siempre a grandes masas de fragmentos y suelen ser de catastróficas consecuencias, (*Fig. V.8*).



Fig. V.8 Flujo de suelo relativamente seco. (Rico, R., y Hermilo, C., 1995).

Se ha dicho que el aire atrapado entre los fragmentos, comprimido bajo fuertes presiones, pudiera desempeñar un importante papel en la génesis del flujo, a través de mecanismos análogos a aquellos por los que manifiesta su influencia la presión de poro en el agua.

Es probable que en todos los casos el verdadero flujo de fragmentos se origine a partir de un deslizamiento convencional en la roca o de un gran desplome de rocas, provenientes de formaciones más sanas, ladera arriba del lugar en donde existan grandes depósitos de fragmentos, en todo caso; para que se llegue a un verdadero flujo de fragmentos de roca será preciso que éstos existan en depósitos de gran espesor y volumen muy considerable. En segundo lugar, los flujos en suelos relativamente secos han ocurrido en loess, asociados muchas veces a temblores, (*Fig. V.9*).

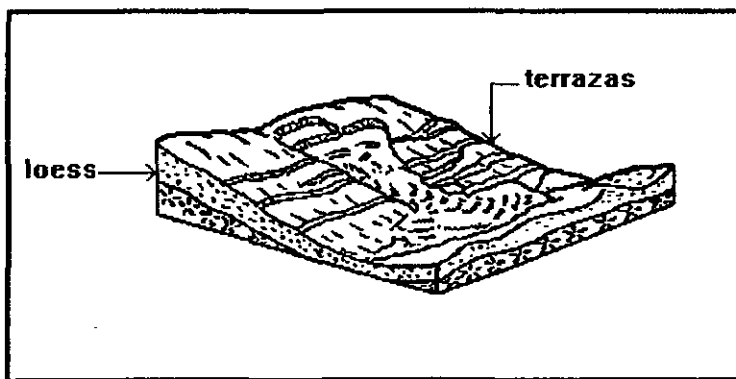


Fig. V.9 Flujo muy rápido de loess (seco), (causado por sismo) (Rico, R., y Hermilo, C., 1995).

En este caso, aparentemente el efecto del temblor fue causar una muy rápida destrucción de la estructura del material, produciendo una verdadera licuación, pero con el aire jugando el papel que en estos fenómenos por lo común corresponde al agua. Fenómenos similares se han registrado en arenas secas, (*Fig. V.10*)

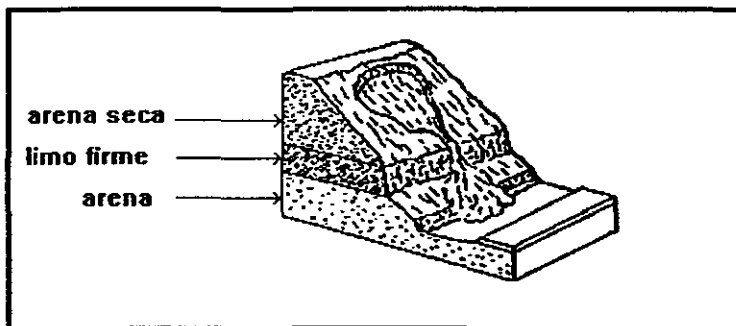


Fig. V.10 Flujo de arena (rápido a muy rápido). (Rico, R., y Hermilo, C., 1995).

2. Flujo en materiales húmedos.

Se trata de flujos que requieren una proporción apreciable de agua contenida en el suelo, la cual desempeña un papel en la génesis y naturaleza de la falla; existe amplia graduación en la cantidad de agua que puedan contener los materiales, así como en el papel que ésta llega a tener en el desarrollo de la falla, (*Fig. V.11*) .

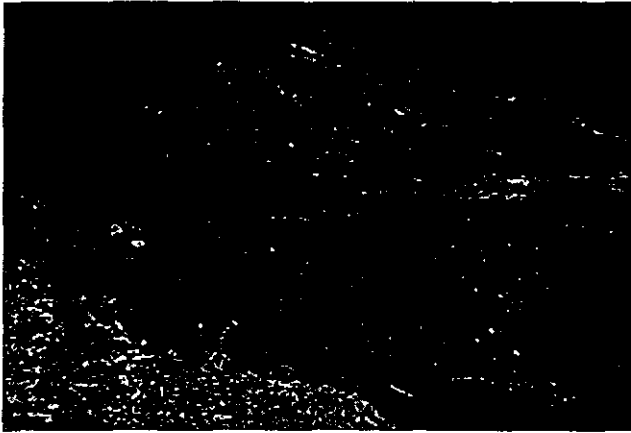


Fig. V.11 Flujo en materiales húmedos. (Rico, R., y Hermilo, C., 1995).

Los flujos en materiales húmedos se denominan flujos de lodo cuando es muy elevado el contenido de agua de los materiales, por lo menos en la zona de fluencia, pero naturalmente no existe una distinción clara entre los flujos de tierra y los flujos de lodo.

En los flujos de lodo, el deslizamiento ocurre en materiales finos con muy alto contenido de agua. La falla produce una completa perturbación estructural, (*Fig. V 12*) .

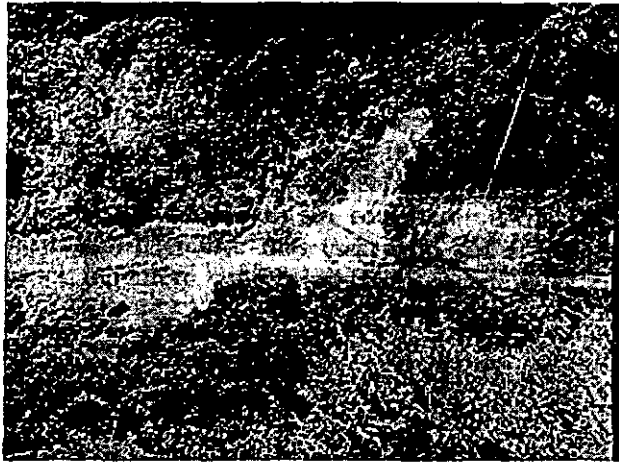


Fig. V.12 Flujo de lodo. (Rico, R., y Hermilo, C., 1995).

La forma típica del deslizamiento es análoga al avance de un glaciar y la velocidad de desplazamiento puede variar; desde algunos pocos centímetros por año, hasta la correspondiente a deslizamientos catastróficos.

En flujos lentos es común que en la velocidad del movimiento influyan mucho las variaciones estacionales del clima. Los movimientos lentos suelen ocurrir en materiales arcillosos fisurados o finamente interestratificados con capas delgadas de arena con alto contenido de agua, ocurren a lo largo de superficies no muy profundas y con inclinación media, que naturalmente; no puede apartarse mucho del valor del ángulo de resistencia residual del suelo, (Fig. V.13).

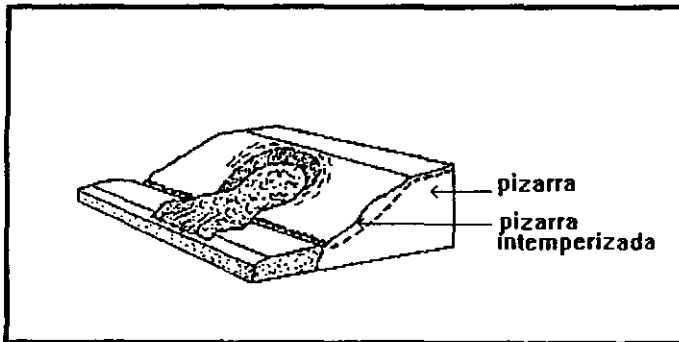


Fig. V. 13 Flujo lento a rápido en materiales húmedos. (Rico, R., y Hermilo, C., 1995).

Por su parte los flujos rápidos suelen seguir a épocas de violenta precipitación pluvial. (Fig. V.14) .

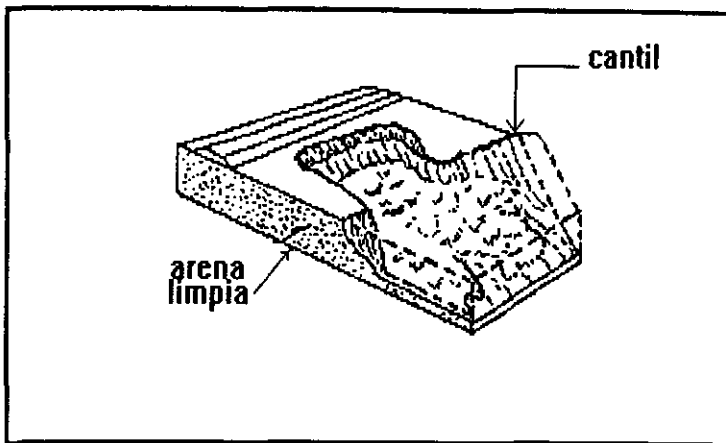


Fig. V.14 Flujo rápido a muy rápido en materiales húmedos. (Rico, R., y Hermilo, C,1995).

Los flujos de lodo muy rápidos se presentan muchas veces en laderas de las que se ha removido la cobertura vegetal por alguna razón y suelen comenzar en muy modestas proporciones, creciendo rápidamente con un poder de transporte de suelo sobre el que pasa que parece fuera de proporción con su importancia inicial; de esta manera se pueden desencadenar auténticos ríos de lodo, capaces de causar verdaderas catástrofes.

Sin duda su génesis debe incluir fenómenos de licuación de suelos, (*Fig. V. 15*).

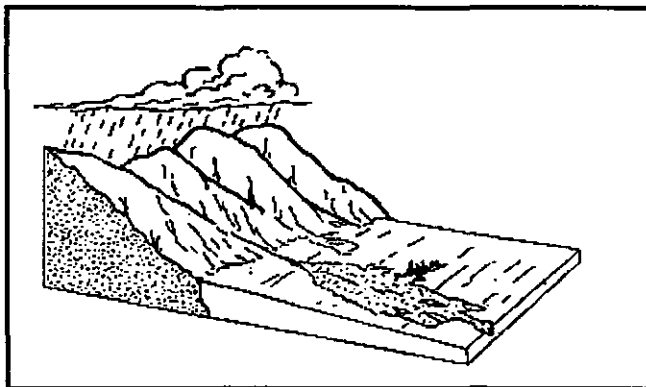


Fig. V.15 Flujo muy rápido en materiales húmedos.(Rico, R., y Hermilo, C., 1995).

V.8.2 FALLAS EN TALUDES ARTIFICIALES

En contraste con los movimientos superficiales descritos en párrafos anteriores, pueden ocurrir en los taludes movimientos bruscos que afecten a masas considerables de suelo con superficies de falla que penetran profundamente en su cuerpo. Estos fenómenos reciben comúnmente el nombre de deslizamiento de tierras.

V.8.2.1 FALLA ROTACIONAL

Las fallas de tipo rotacional suelen producirse a lo largo de superficies de falla identificables con superficies cilíndricas o conoideas cuya traza con el plano de papel sea un arco de circunferencia (por lo menos con razonable aproximación), (*Fig.V.16*), o pueden adoptar formas algo diferentes, en las que por lo general influyen la secuencia geológica local, el perfil estratigráfico y la naturaleza de los materiales. Pueden llegar a ser demasiado peligrosas, (*Fig.V.17*).

Las fallas rotacionales circulares ocurren por lo común en materiales arcillosos homogéneos o en suelos cuyo comportamiento mecánico esté regido básicamente por su función arcillosa. En general afecta a zonas relativamente profundas del talud, siendo esta profundidad mayor cuanto más escarpado sea aquel.



Fig. V.16 Falla rotacional. (Rico, R., y Hermilo, C., 1995).

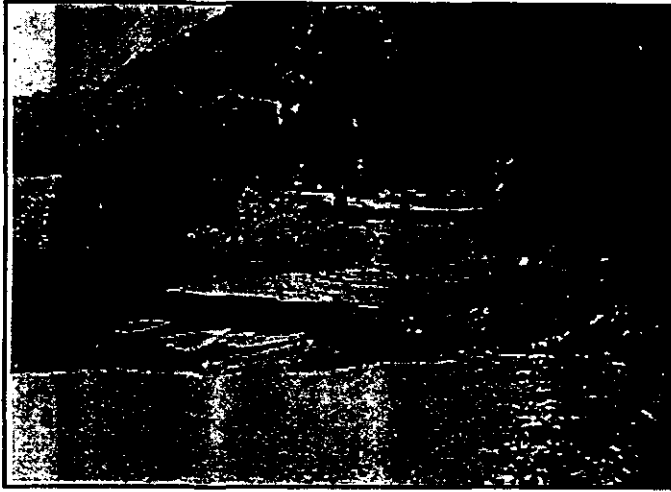


Fig. V.17 Camino destruido por una gran falla rotacional en el camino Toluca-Morelia (Rico, R., y Hermilo, C., 1995).

Las fallas rotacionales circulares pueden ser de *base del talud*, de *pie del talud* o de *frente del talud*.

- *Falla de base del talud.*

Se produce en arcillas blandas o con numerosas vetas blandas. La parte superior del talud se cae dejando un escarpe vertical; mientras que el terreno a nivel situado más allá del pie del talud se levanta en comba, (*Figs. V.18 y V.19*).

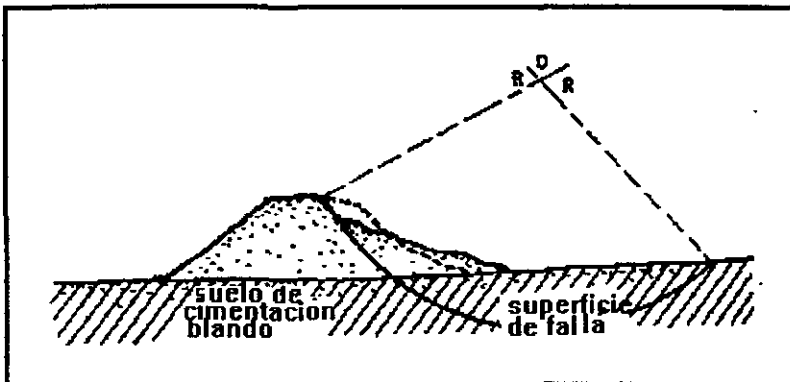


Fig. V.18 Falla de base. (Rico, R., y Hermilo, C., 1995).



Fig. V.19 Falla rotacional de base.(Rico, R., y Hermilo, C., 1995).

- **Falla de pie del talud.**

Se produce en taludes de gran pendiente y en suelos que tienen un ángulo de fricción interna apreciable.

La parte superior del talud cae formando frecuentemente una serie de escalones, mientras que el terreno situado cerca del extremo inferior del talud se comba hacia afuera cubriendo el pie del talud, (Figs. V.20 y V.21).

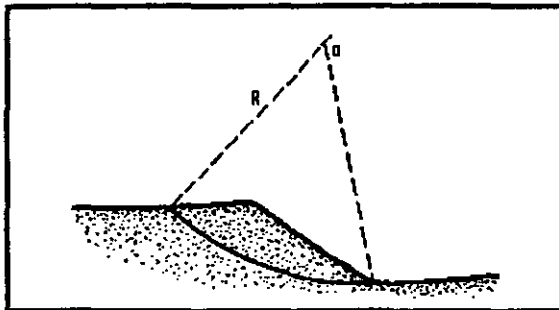


Fig.V.20 Falla por el pie del talud.(Rico, R., y Hermilo, C., 1995).



Fig. V.21 Falla rotacional por el pie del talud (autopista Puebla-Orizaba). (Rico, R., y Hermilo, C., 1995).

- **Falla de frente del talud.**

Es un caso especial de la falla del pie de talud, en el que la presencia de un estrato duro limita la extensión de la superficie de falla, (Fig. V.22).

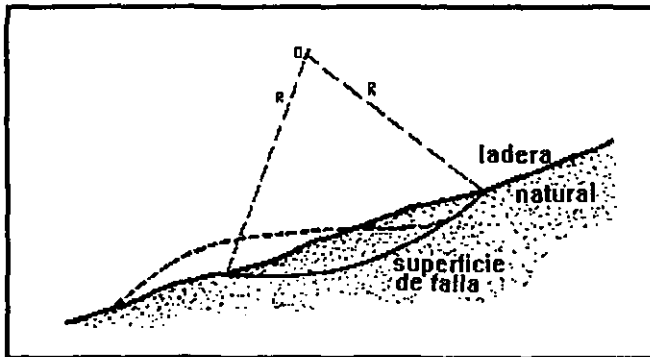


Fig. V.22 Falla de frente del talud. (Rico, R., y Hermilo, C., 1995).

Al ocurrir las fallas circulares pueden afectar a masas muy anchas, en comparación con las dimensiones generales de la falla, en cuyo caso generan verdaderas superficies

cilíndricas o pueden ocurrir en forma concoidal, con un ancho pequeño comparado con su longitud, (Figs. V.23-a y V.23-b).

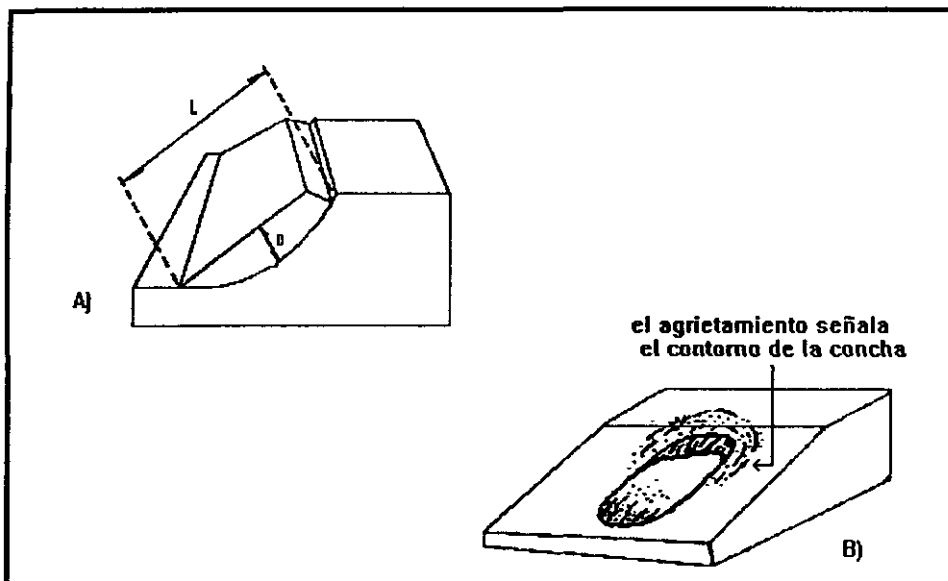


Fig. V.23 Tipos de falla rotacionales.(Rico, R., y Hermilo, C., 1995).

La Fig. V. 23-c muestra una perspectiva de una falla típica. Obsérvese la nomenclatura usual.

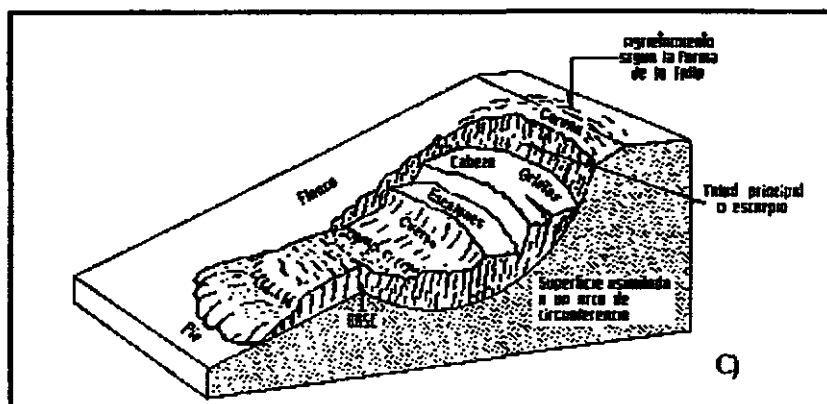


Fig. V.23-c Falla rotacional con la nomenclatura más usual. (Rico, R., y Hermilo, C., 1995).

V.8.2.2 FALLA TRASLACIONAL

Estas fallas por lo general consisten en movimientos traslacionales importantes del cuerpo del talud sobre superficies de falla básicamente planas, asociadas a la presencia de estratos poco resistentes localizados a poca profundidad bajo el talud.

La superficie de falla se desarrolla en forma paralela al estrato débil y se remata en sus extremos por dos cantiles, por lo general formados por agrietamiento, (*Fig. V.24*).

Los estratos débiles que fomentan estas fallas son por lo general de arcillas blandas, de arenas finas o limos no plásticos sueltos.

Con mucha frecuencia la debilidad del estrato está ligada a elevadas presiones de poro en el agua contenida en las arcillas o a fenómenos de elevación de presión de agua en estratos de arena (acuíferos).

Por esto, las fallas pueden estar también ligadas al calendario de las temporadas de lluvia en la región, (*Fig. V.25*).



Fig. V.24 Desarrollo de una falla traslacional (Cortesía T. Smith, Depto. de carreteras de California, U.S.A.).

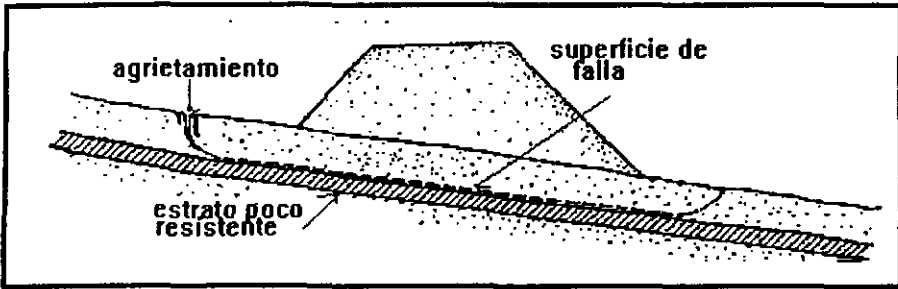


Fig. V.25 Falla traslacional (Rico, R., y Hermilo, C., 1995)

V.8.2.3 FALLAS CON SUPERFICIE COMPUESTA

Este tipo de fallas abarca movimientos combinados de rotación y traslación originándose así las superficies de falla compuestas en que se desarrollan zonas planas a la vez que tramos curvos, semejantes a arcos circulares, (Fig.V.26). En general, el predominio de las partes circulares o planas determinará o ayudará en muchos casos a clasificar la falla como rotacional o traslacional, quedando la categoría de falla compuesta para los casos en que ambas curvas se reparten más o menos igual.

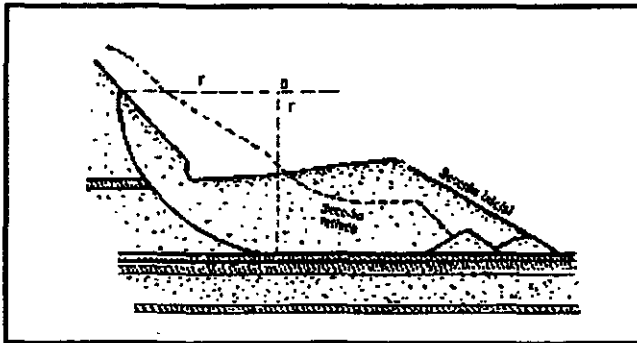


Fig. V.26 Falla compuesta. (Rico, R., y Hermilo, C., 1995).

V.8.2.4 FALLAS MÚLTIPLES

Son fallas que se producen con varias superficies de deslizamiento, sean simultáneas o en rápida sucesión. Conviene distinguir las fallas sucesivas y regresivas. Ambas son comunes en laderas naturales en las que se practicó un corte.

Las fallas regresivas se forman a partir de una primera falla (la que está más abajo de la ladera), por la inestabilidad en la que sucesivamente van quedando las zonas de cabeza de cada falla que se forma.

Todas las superficies de falla suelen concurrir a una superficie fundamental. Pueden existir de tipo rotacional o traslacional.

- **Fallas rotacionales regresivas.**

Ocurren con frecuencia en regiones de topografía escalonada, en donde el fenómeno de la erosión está presente, especialmente si existen estratos gruesos de arcillas sobreconsolidadas, fisuradas o de lutitas; sobreyacidos por espesores grandes de roca o suelos firmes, (Fig. V.27).

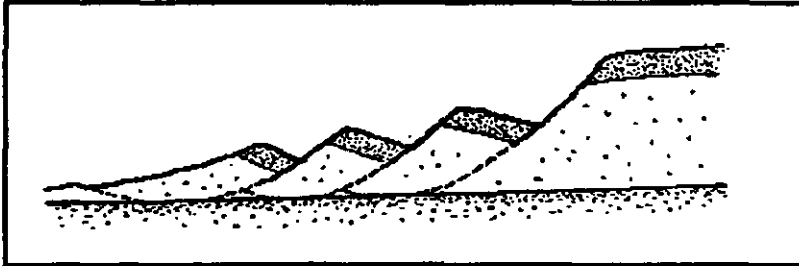


Fig.V.27 Falla rotacional regresiva. (Rico, R., y Hermilo, C., 1995).

- **Falla traslacional regresiva.**

Ocurren en capas superficiales y muchas veces también se asocian a arcillas fisuradas y lutitas. Parece que cuanto más cohesivo sea el material, menos unidades tienden a formarse en la masa deslizante, (Fig. V.28).

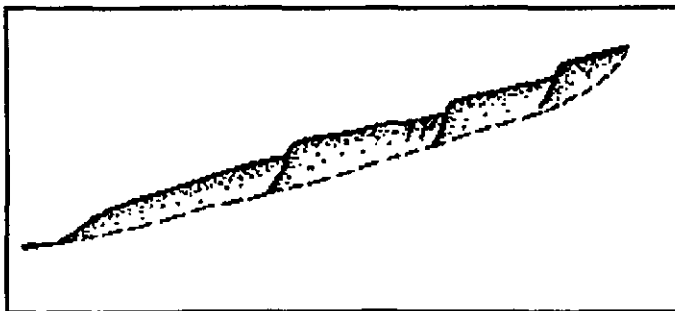


Fig.V.28 Falla traslacional regresiva. (Rico, R., y Hermilo, C., 1995).

- **Fallas sucesivas.**

Las fallas sucesivas; suelen consistir en un conjunto de deslizamientos rotacionales superficiales. Son características de las últimas etapas de degradación en laderas de arcilla sobreconsolidada o fisurada. A veces las fallas forman un escalonamiento sumamente regular, (*Fig.V.29*).

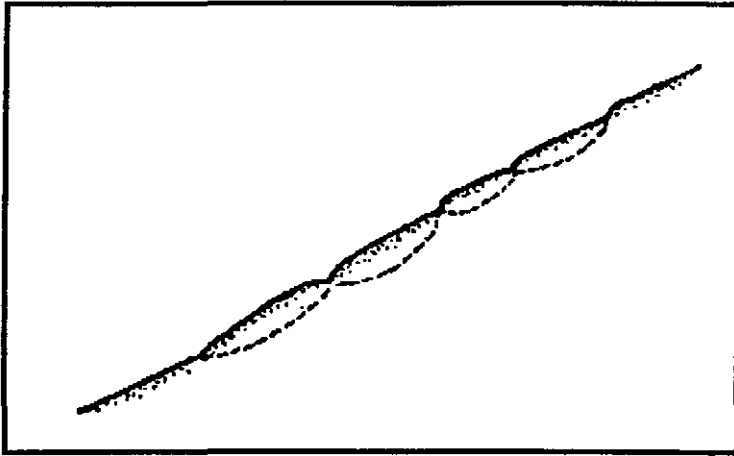


Fig.V.29 Falla sucesiva. (Rico, R., y Hermilo, C., 1995).

VI RESULTADOS

A partir de los antecedentes y la problemática presentada en la localidad conocida como "El Cantil", y al grave riesgo que corren los asentamientos humanos en esta zona minada; se planteó una alternativa de solución; que a nuestro criterio es la más adecuada; considerando en ella a las carencias económicas, la falta de conocimiento por parte de los colonos en esta zona de alto riesgo y el descuido y/o negligencia de la autoridades por permitir este tipo de asentamientos humanos en dichas zonas.

A la fecha es del conocimiento público que no existe la aplicación de un programa de urbanismo; cuya normatividad contemple algunos factores de riesgo geológico que condicionen cualquier tipo de actividad humana. De tal suerte que en la mayoría de los casos en los que haya que plantear una o varias soluciones a un problema; estas no estarán encaminadas a *prever*, sino más bien; *reparar*, llevando implícito en ello: pérdida de tiempo, un alto costo económico o bien; una falta de aceptación social, como lo podría ser la reubicación de Colonias enteras, por ejemplo.

En "El Cantil", se adecuó y se aplicaron los conocimientos Geológico-Geotécnicos a la solución del problema desde una perspectiva social; situación que podrá ser; por demás cuestionada y criticada.

En primera instancia; retomamos los resultados de los estudios previos, las evidencias físicas y el empleo de propiedades mecánicas, así como de las características geológicas del talud, que nos condujeron al espaciamiento físico de todos aquellos parámetros (litología, erosión, fracturas, cavidades, asentamientos, vialidad, desagües, rellenos, etc..) que se involucran directamente en la estabilidad del terreno.

El estudio minero; revela la presencia de una cavidad irregular con varias ramificaciones, con un desarrollo lineal de alrededor de 205 m. y con sección transversal de 4 m., la cual ubicamos por debajo de la manzana que circundan las Calles de Seminario, Continuación de Seminario y Callejón de Palmas, con un área de afectación de 3750 m² aproximadamente (área calculada a escala a partir del croquis del levantamiento minero proyectado en superficie). Siendo el flanco Noroeste del talud, el que presenta severos problemas de inestabilidad.

La Geología local de la zona; describe a la secuencia afectada como depósitos vulcanoclásticos heterogéneos poco consolidados, con intercalaciones de limonitas y tobas líticas y pumíticas, la cual fue dividida en cinco subunidades de acuerdo a su composición, color, granulometría y consolidación o compactación. De aquí caracterizamos a la unidad tres (U₃), considerando que fue esta el horizonte de explotación y es donde se encuentra la caverna, por lo que sus repercusiones de erosión e intemperismo favorecen al fallamiento del terreno.

La Unidad Litológica Tres (U₃), se localiza a una profundidad de 40 m. por debajo de la corona del talud, su composición es de arenas y Tobsas líticas y su mineralogía es: cuarzo, pómez, micas, piroxenos y fragmentos de roca en porcentajes aproximados de 7 %, 60 %, 3 %, 5 % y 25 % respectivamente.

Carece esencialmente de un cementante entre los constituyentes que favorezca su cohesión y compactación, mismo que se puede relacionar directamente con la permeabilidad de la roca en la infiltración de aguas pluviales y residuales; teniendo por lo tanto que los agentes de intemperismo y erosión facilitan al interior de la caverna, el desprendimiento de bloques.

Así pues, su relación de composición mineralógica; establece una unidad fácilmente alterable para aquellos elementos de micas, vidrio volcánico y plagioclasas expuestos a condiciones atmosféricas.

Las evidencias físicas de los factores que anteriormente hemos mencionado; las pudimos observar en la entrada de una mina que aún no ha sido regenerada, debido a que el dueño del predio donde se localiza esta; impide el acceso a ella. Es posible observar en las caras externas, (paredes y techo), la formación de caídos y de bloques que están por desprenderse.

Cabe hacer mención que en dicho terreno existen algunas construcciones del tipo casa-habitación, cuya cimentación y mampostería se encuentra a escasos metros del techo de la mina y en donde desgraciadamente hasta el momento no existe tratamiento alguno siendo "basura", el unico relleno que hay en ella (misma que es arrojada al interior por los moradores del predio).

Por otro lado; consideramos favorable a la estabilidad del terreno, que la Colonia cuenta con alcantarillado de aguas residuales en un 99 %, con lo que podemos decir que este factor esta controlado.

En conjunto con la Geología Estructural y el Levantamiento Minero, la Geofísica aporta datos que pueden correlacionarse directamente con el desarrollo de las cavernas a profundidad, los espesores de encape y el fracturamiento.

Con base en la Geología y la Geofísica, concluimos que la anomalía sobre la línea 1-1' a lo largo de la Calle Continuación de Seminario, puede asociarse directamente con la presencia de las cavidades cartografiadas por el levantamiento minero. Así mismo, el análisis de la anomalía geoelectrica de la línea 2-2' sobre la Calle Seminario; es afín con el fallamiento reportado por la Geología en superficie.

De lo anterior; cabe hacer algunas aclaraciones.

El patrón de fracturamiento no es una consecuencia directa del desarrollo de la falla circular; sino que es más bien producido por las excavaciones subterráneas que debilitan

fuertemente el terreno, haciéndolo cada vez más inestable e inseguro generándose así tal fracturamiento.

Los espesores de encape se consideran aceptables si tomamos en cuenta las irregularidades de la topografía superficial, al igual que las variantes en el desarrollo de las obras de minado.

El desarrollo de un patrón irregular de fracturamiento a todo lo largo del frente del talud, cuyas profundidades sobrepasan las cavidades minadas y con base en el análisis de los estereogramas, hacen suponer un sistema conjugado de fracturamiento en desarrollo que origina que los bloques caigan por volteo o en algunos casos; se formen acuíñamientos. Este sistema esta asociado directamente con las cavidades de las antiguas minas y con las posibles discordancias e indirectamente con el posible deslizamiento de la falla circular del frente del talud; el cual al no poseer un reforzamiento al frente del mismo; origina que la gravedad imperante lo obligue a deslizarse.

Por consiguiente, el empleo de un método de cálculo como lo es el Método de las Dovelas (Fellenius) aplicable a suelos o rocas no consolidadas; en combinación con la información obtenida, nos permitió llegar a los resultados y conclusiones que a continuación presentamos, dejando abierta la posibilidad de que estas sean por demás, criticadas y cuestionadas por parte de los expertos en la materia; con la finalidad claro esta, de que estas sirvan para mejorar en la medida de lo posible este modesto trabajo de investigación.

VI.1 APLICACION DEL METODO DE LAS DOVELAS EN EL TALUD DENOMINADO "EL CANTIL" E INTERPRETACION DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

Para la correcta aplicación del Método, fue necesario en primera instancia; hacer el correspondiente muestreo representativo del material de cada uno de los estratos que conforman al talud.

Posteriormente, se procedió a determinar en el laboratorio las propiedades de interés de cada muestra colectada (peso específico, cohesión y fricción), obteniéndose los resultados que a continuación se presentan:

<i>Estrato</i>	<i>Peso específico</i> <i>(Ton / m³)</i>	<i>Cohesión</i> <i>(Ton / m²)</i>	<i>Fricción</i> <i>(°)</i>
U ₁	1.36	8	30
U ₂	1.89	10	10
U ₃	1.36	8	28
U ₄	1.36	4	28
U ₅	1.36	1	26

Por otra parte, para la aplicación del Método de las Dovelas hubo la necesidad de tomar un "valor de frontera" del Factor de Seguridad, esto es; el valor de una constante (que para nuestro análisis fue el de 1.5), que nos pudiera indicar durante la interpretación de los resultados, cuando un talud es *estable* y cuando *inestable*. Llamamos a este valor de frontera; *Factor de Seguridad Base (Fs_B)*.

Con lo anterior se tiene por lo tanto, que cuando el Factor de Seguridad de nuestro análisis (FS_A), es mayor o igual al Factor de Seguridad Base (FS_B), el talud "será estable" y por el contrario; cuando el Factor de Seguridad de nuestro análisis (FS_A) es menor al Factor de Seguridad Base (FS_B), el talud "será inestable".

Resumiendo se tiene:

$$(FS_B) = 1.5$$

$$(FS_A) = X$$

y cuando:

$$(FS_A) > (FS_B) \text{ ó}$$

$$(FS_A) = (FS_B)$$

entonces tendremos un talud estable, pero si ocurre que:

$$(FS_A) < (FS_B)$$

entonces tendremos un talud inestable.

Para tener un mejor control durante la aplicación del Método y para interpretar mejor los resultados, se optó por dividir en dos partes al talud para su estudio; denominándolos :

- **Caso A**
- **Caso B**

ambos con sus respectivas subdivisiones. Veamos el análisis de cada una de ellos :

- **CASO A**

Este caso corresponde al talud Norte, el cual es paralelo a la Calle Continuación de Seminario.

En este se aprecia la existencia de una caverna en la Unidad Litológica Tres (U₃), pero es necesario mencionar que no aflora ninguna superficie potencial de falla en el talud (o al menos no se aprecia en el terreno).

CASO A1)

Por lo anterior, hubo la necesidad de suponer *la existencia de una superficie potencial de falla circular que corriera desde la corona hasta la base de la Unidad Uno (U₁)*, como se muestra en la **Fig. VI.1**, esto con el propósito de conocer el comportamiento mecánico que pudiera adquirir el talud en el supuesto caso de que sí existiera la falla.

Al aplicar el Método de las Dovelas (**Tabla 7**), se obtuvo un valor del Factor de Seguridad de la Unidad Uno (U₁) de 18.565. Tomando como referencia el valor del Factor de Seguridad Base (FS_B) de 1.5 (al que nos referimos anteriormente) y comparándolos a ambos tenemos lo siguiente:

$$(FS_B) = 1.5$$

$$(FS_{U1}) = 18.565$$

y como:

$$(FS_{U1}) > (FS_B)$$

$$18.565 > 1.5$$

concluimos que el talud es estable aún en el caso de que sí existiera una falla en esa unidad.

CASO A2)

En lo que a la Unidad Dos (U₂) respecta; de igual forma que en el análisis anterior se supuso *una nueva superficie potencial de falla que fuese desde la corona del talud y llegara hasta la base de esta unidad (Fig. VI.2)*.

Al proceder a hacer el estudio comparativo de este valor contra el FS_B, para establecer la condición de estabilidad o inestabilidad del terreno, se llegó a la conclusión de que el talud sigue siendo estable, pues como se muestra en la **Tabla 8**, el Factor de Seguridad obtenido (FS_{U2}) es igual a 10.239. Resumiendo tenemos lo siguiente:

$$(FS_{U2}) = 10.239$$






$$(FS_B) = 1.5$$

como:

$$(FS_{U2}) > (FS_B)$$

$$10.239 > 1.5$$

por lo tanto se considera que el talud sigue siendo estable.

-  U1 Arenas de grano medio a fino.
-  U2 Arcilla con arena fina.
-  U3 Arena media
-  U4 Arena gruesa
-  U5 Arena fina arcillosa

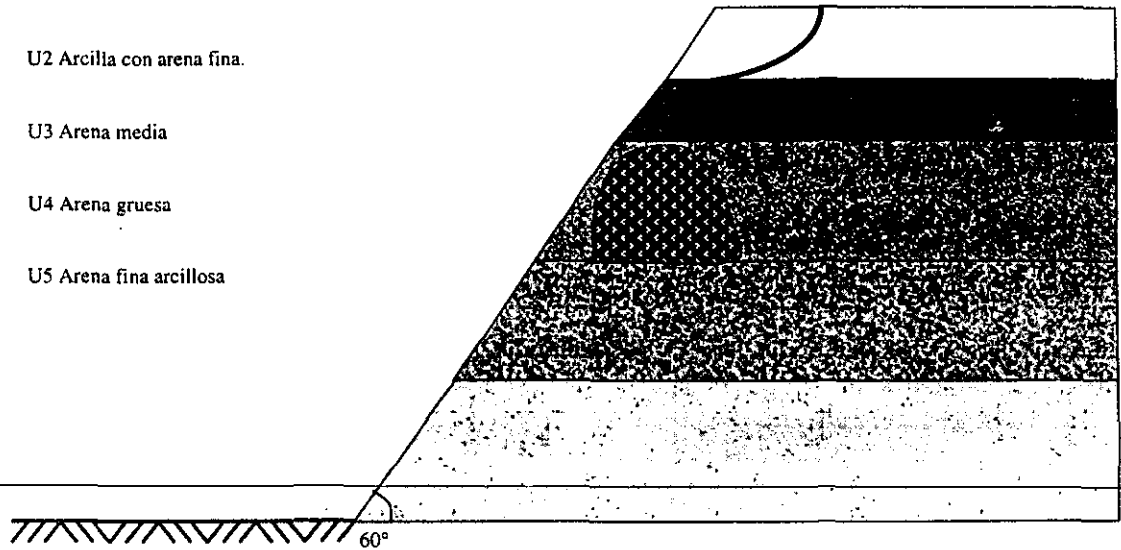







FIG. VI.1 CASO A1) SUPERFICIE POTENCIAL DE FALLA SUPUESTA EN LA UNIDAD LITOLOGICA 1

TABLA 7 CASO A1 APLICACION DEL METODO DE LAS DOVELAS CON SUPERFICIE POTENCIAL DE FALLA SUPUESTA EN LA UNIDAD LITOLOGICA 1.

DOVELA	AREA	W	C									
1	2.21	3.016	8	30	1.9	9	0.156	0.988	0.472	15.200	1.720	
2	4.375	5.971	8	30	2.6	19	0.326	0.946	1.944	20.800	3.260	
3	1.495	2.04	8	30	2.65	29	0.485	0.875	0.989	21.200	1.030	
SUMA									3.405	57.200	6.010	

-  U1 Arenas de grano medio a fino.
-  U2 Arcilla con arena fina.
-  U3 Arcna media
-  U4 Arcna gruesa
-  U5 Arena fina arcillosa

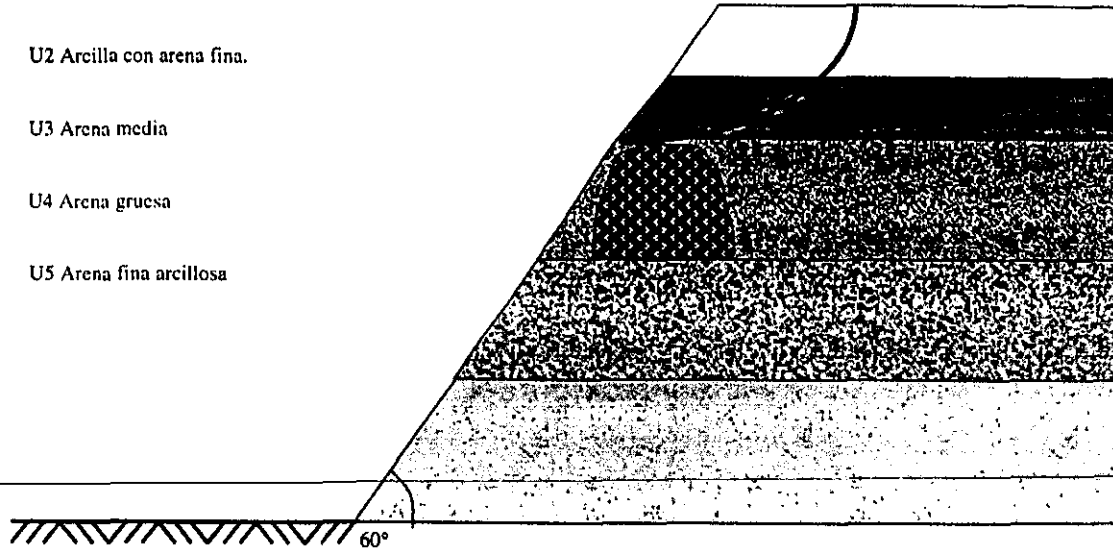


FIG. VI.2 CASO A2) SUPERFICIE POTENCIAL DE FALLA SUPUESTA EN LA UNIDAD LITOLÓGICA 2

TABLA 8 CASO A2 APLICACION DEL METODO DE LAS DOVELAS CON SUPERFICIE POTENCIAL DE FALLA SUPUESTA EN LA UNIDAD LITOLÓGICA 2.

1	0.9	1.708	10	10	1.2	1	0.017	1.000	0.030	12.000	0.301
2	5.175	6.621	10	10	2.0	7	0.122	0.993	0.807	20.000	1.159
3	6.51	9.558	10	10	2.4	30	0.500	0.866	4.779	24.000	1.460
4	3.375	4.606	8	30	3.6	43	0.682	0.731	3.141	28.800	1.945
									8.757	84.800	4.864
											10.238

CASO A3)

El estudio de esta unidad se hizo con base a cuatro análisis:

1.- CASO A3.1)

El primero *supone una superficie potencial de falla circular que va de la corona del talud a la caverna allí presente (Fig. VI.3).*

Es importante señalar que en el análisis matemático, los valores que tomaron la cohesión y la fricción en las dovelas 2 y 3, fueron valores de cero (*Tabla 9*), pues hay que considerar que la caverna es una zona hueca (sin material); que afecta específicamente a dichas dovelas.

Al efectuar las operaciones requeridas por el Método de las Dovelas; se obtuvo un valor del Factor de Seguridad de 3.88, que es mayor al valor de 1.5 tomado como base, es decir; que tenemos lo siguiente:

$$\begin{aligned} (FS_{U3.1}) &= 3.88 \\ (FS_B) &= 1.5 \end{aligned}$$

como:

$$\begin{aligned} (FS_{U3.1}) &> (FS_B) \\ 3.88 &> 1.5 \end{aligned}$$

entonces consideramos que el talud seguirá siendo estable; aunque nos percatamos de que este Factor de Seguridad (3.88), se redujo considerablemente en relación a los anteriores casos, debido probablemente a la existencia de la caverna presente en el cuerpo del talud.

2.- CASO A3.2)

Este segundo caso *considera a la misma superficie potencial de falla anterior, pero ahora supone que la caverna ha sido regenerada totalmente*, es decir; que "ya no existe tal hueco" en la Unidad Tres (U_3), como se muestra en la *Fig. VI.4*, por lo que los valores de la cohesión y la fricción de los materiales que pertenecen a las dovelas 2 y 3 tomaron sus correspondientes valores, (*Tabla 10*). Ahora bien, el análisis matemático arroja un valor del Factor de Seguridad obtenido de 4.801, por lo tanto tenemos lo siguiente:






$$\begin{aligned} (FS_{U3.2}) &= 4.801 \\ (FS_B) &= 1.5 \end{aligned}$$

como:

$$\begin{aligned} (FS_{U3,2}) &> (FS_B) \\ 4.801 &> 1.5 \end{aligned}$$

el talud se considera nuevamente estable.

Se observa que el valor del Factor de Seguridad obtenido en este Caso ($FS_{U3,2}$) fue el de 4.801, mismo que aumentó en relación al caso anterior ($FS_{U3,1} \approx 3.88$) por lo que concluimos que la presencia de la caverna es un factor importante que afectará directamente al valor del Factor de Seguridad, disminuyéndolo considerablemente.

-  U1 Arenas de grano medio a fino.
-  U2 Arcilla con arena fina.
-  U3 Arena media
-  U4 Arena gruesa
-  U5 Arena fina arcillosa

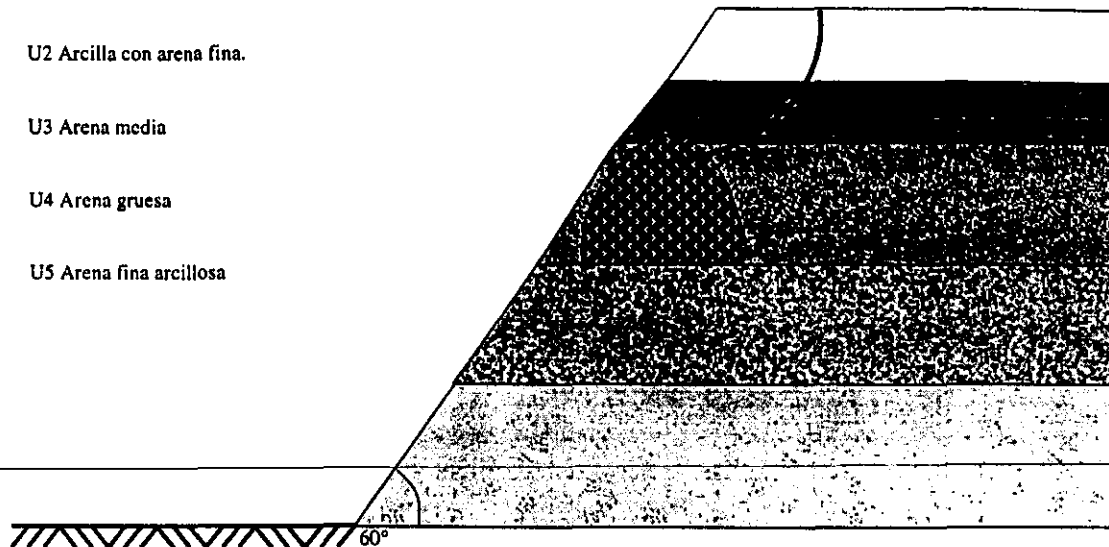





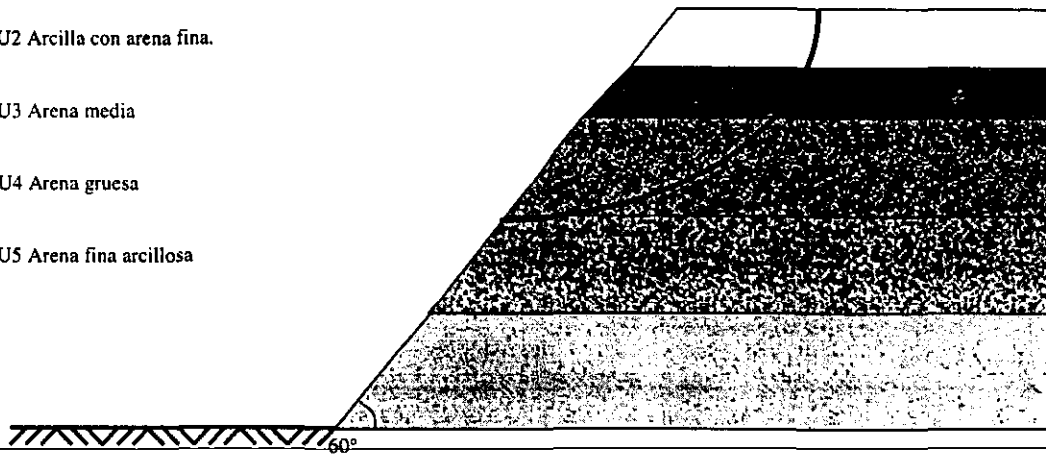


FIG. VI.3 CASO A3.1) SUPERFICIE POTENCIAL DE FALLA SUPUESTA EN LA UNIDAD LITOLÓGICA 3, *CON CAVERNA*

TABLA 9 CASO A3.1 APLICACION DEL METODO DE LAS DOVELAS CON SUPERFICIE POTENCIAL DE FALLA SUPUESTA EN LA UNIDAD LITOLÓGICA 3, CON CAVERNA.

DOVELA	AREA (m ²)	AREA (m ² /m)	AREA (m ² /m)	AREA (m ² /m)	AREA (m ² /m)	AREA (m ² /m)	AREA (m ² /m)	AREA (m ² /m)	AREA (m ² /m)	AREA (m ² /m)	AREA (m ² /m)	AREA (m ² /m)
1	2.25	3.071	8	28	1.9	8	0.139	0.990	0.427	15.200	1.617	
2	3.36	4.586	0	0	1.3	19	0.326	0.946	1.493	0	0	
3	4.68	6.9	0	0	1.3	25	0.423	0.906	2.916	0	0	
4	10.10	15.44	8	28	2.3	30	0.500	0.866	7.720	18.400	7.110	
5	9.399	14.44	8	28	2.5	41	0.656	0.755	9.471	20.000	5.793	
6	4.225	6.322	10	10	2.0	51	0.777	0.629	4.913	20.000	0.702	
7	1.75	2.389	8	30	2.9	59	0.857	0.515	2.048	23.200	0.710	
									28.988	96.800	15.931	

-  U1 Arenas de grano medio a fino.
-  U2 Arcilla con arena fina.
-  U3 Arena media
-  U4 Arena gruesa
-  U5 Arena fina arcillosa



**FIG. VI.4 CASO A3. 2) SUPERFICIE POTENCIAL DE FALLA SUPUESTA EN LA UNIDAD LITOLÓGICA 3,
*SIN CAVERNA***

TABLA 10 CASO A3.2 APLICACION DEL METODO DE LAS DOVELAS CON SUPERFICIE POTENCIAL DE FALLA SUPUESTA EN LA UNIDAD LITOLÓGICA 3, SIN CAVERNA.

DOVELA	AREA	AREA	AREA	AREA	AREA	AREA	AREA	AREA	AREA	AREA	AREA	AREA
1	2.25	3.071	8	28	1.9	8	0.139	0.990	0.427	15.200	1.617	
2	3.36	4.586	8	28	1.3	19	0.326	0.946	1.493	10.400	2.306	
3	4.68	6.9	8	28	1.3	25	0.423	0.906	2.916	10.400	3.325	
4	10.10	15.44	8	28	2.3	30	0.500	0.866	7.720	18.400	7.110	
5	9.399	14.44	8	28	2.5	41	0.656	0.755	9.471	20.000	5.793	
6	4.225	6.322	10	10	2.0	51	0.777	0.629	4.913	20.000	0.702	
7	1.75	2.389	8	30	2.9	59	0.857	0.515	2.048	23.200	0.710	
									28.988	117.600	21.562	

3.- CASO A3.3)

El tercer caso supone a la misma superficie potencial de falla a la que se ha hecho mención anteriormente, pero ahora se auna la presencia de la caverna y el peso que ejerce un trailer al circular por la corona del talud (Fig. VI.5).

Al efectuar los cálculos matemáticos respectivos se obtuvo un valor del Factor de Seguridad de 2.771 (Tabla II), el cual como se puede apreciar es mucho menor que en los anteriores casos debido a que el análisis se hizo con la existencia de una caverna y con el peso de un trailer cargado (35 Ton. aproximadamente) teniendo lo siguiente:

$$(FS_{U3.3}) = 2.771$$

$$(FS_B) = 1.5$$

como.

$$(FS_{U3.3}) > (FS_B)$$

$$2.771 > 1.5$$

esto implica que el talud es estable, aunque en necesario hacer hincapié en que el valor del Factor de Seguridad disminuyó considerablemente.

4.- CASO A3.4)

Por último, este caso es idéntico al anterior, con la excepción de que ahora el análisis no considera la existencia de ninguna caverna (Fig. VI.6).

El resultado del valor del Factor de Seguridad obtenido bajo estas condiciones fue el de 3.340 (Tabla 12). Este valor es mayor al del Caso A3.3 debido probablemente a que el peso del trailer no afecta mucho al talud por no existir huecos u oquedades en el cuerpo de este.

Resumiendo se tiene:

$$(FS_{U3.4}) = 3.340$$

$$(FS_B) = 1.5$$

y como:

$$(FS_{U3.4}) > (FS_B)$$

$$3.340 > 1.5$$

tenemos que el talud es estable bajo estas condiciones perdurantes.

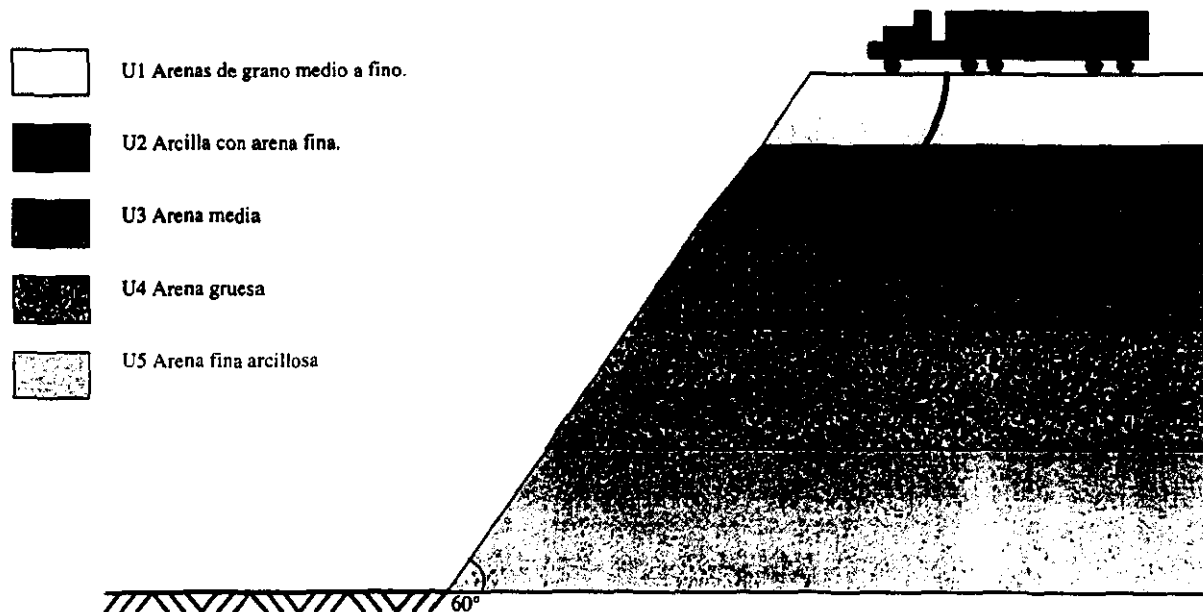


FIG. VI.5 CASO A3.3) SUPERFICIE POTENCIAL DE FALLA SUPUESTA EN LA UNIDAD LITOLÓGICA 3, CON CAVERNA Y CON PESO DE TRAILER

TABLA 11 CASO A3.3 APLICACION DEL METODO DE LAS DOVELAS CON SUPERFICIE POTENCIAL DE FALLA SUPUESTA EN LA UNIDAD LITOLÓGICA 3, CON CAVERNA Y CON PESO DEL TRAILER.

DOVELA	AREA (m^2)	W (Ton./m)	C (Ton./m ²)	α ($^\circ$)	L (m)	β ($^\circ$)	sen α	cos α	W sen α	L * C	W cos α * tan β
1	2.25	3.071	8	28	1.9	8	0.139	0.990	0.427	15.200	1.617
2	3.36	4.586	0	0	1.3	19	0.326	0.946	1.493	0	0
3	4.68	6.9	0	0	1.3	25	0.423	0.906	2.916	0	0
4	10.10	50.44	8	28	2.3	30	0.500	0.866	25.220	18.400	23.226
5	9.399	14.44	8	28	2.5	41	0.656	0.755	9.471	20.000	5.793
6	4.225	6.322	10	10	2.0	51	0.777	0.629	4.913	20.000	0.702
7	1.75	2.389	8	30	2.9	59	0.857	0.515	2.048	23.200	0.710
SUMA									46.488	96.800	32.047
										FS =	2.771

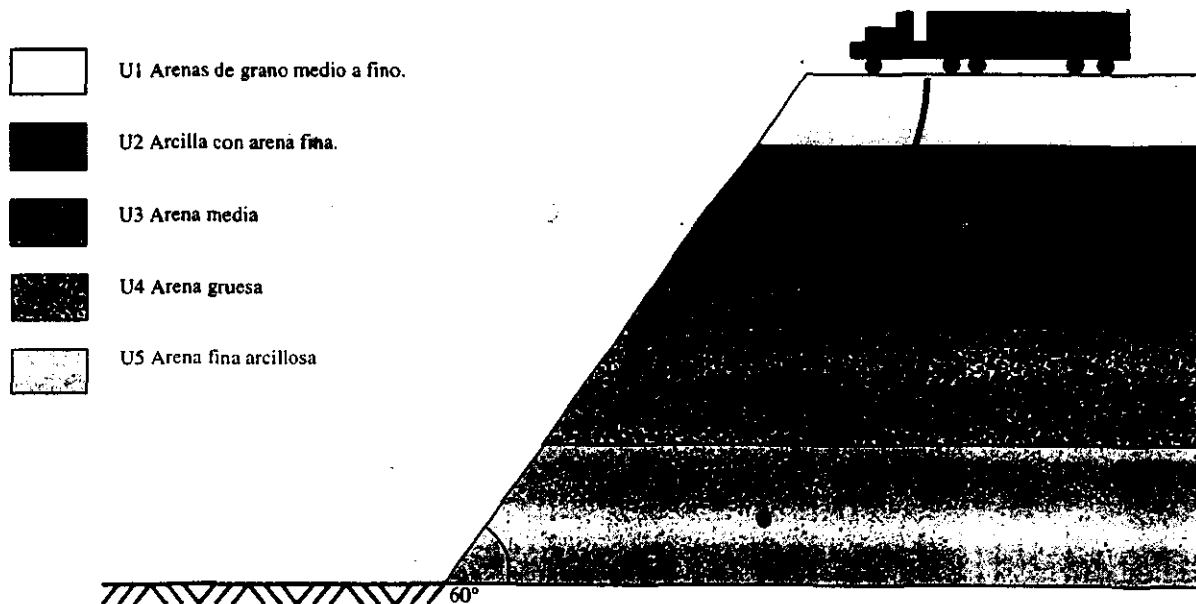


FIG. VI.6 CASO A3.4) SUPERFICIE POTENCIAL DE FALLA SUPUESTA EN LA UNIDAD LITOLÓGICA 3, SIN CAVERNA Y CON PESO DE TRAILER

TABLA 12 CASO A3.4 APLICACION DEL METODO DE LAS DOVELAS CON SUPERFICIE POTENCIAL DE FALLA SUPUESTA EN LA UNIDAD LITOLÓGICA 3, SIN CAVERNA Y CON PESO DEL TRAILER.

DOVELA	AREA (m ²)	W (Ton/m)	C (Ton/m ²)	φ (°)	L (m)	α (°)	sen α	cos α	Wsen α	E·C	W cos α · tan α
1	2.25	3.071	8	28	1.9	8	0.139	0.990	0.427	15.200	1.617
2	3.36	4.586	8	28	1.3	19	0.326	0.946	1.493	10.400	2.306
3	4.68	6.9	8	28	1.3	25	0.423	0.906	2.916	10.400	3.325
4	10.1	50.44	8	28	2.3	30	0.500	0.866	25.220	18.400	23.226
5	9.399	14.44	8	28	2.5	41	0.656	0.755	9.471	20.000	5.793
6	4.225	6.322	10	10	2.0	51	0.777	0.629	4.913	20.000	0.702
7	1.75	2.389	8	30	2.9	59	0.857	0.515	2.048	23.200	0.710
SUM									46.488	117.600	37.678
										FS =	3.340

CASO A4)

Finalmente para concluir el estudio del talud Norte, seguimos la misma metodología de análisis para la Unidad Cuatro (U₄).

Supusimos la superficie potencial de falla desde la corona y hasta la base de esta unidad, sin considerar la caverna pues ya que se encuentra en la Unidad Litológica anterior (U₃), como lo muestra la Fig. VI.7.

El método analítico da un Factor de Seguridad de 3.129, (*Tabla 13*). Tenemos así que:

$$(FS_{U4}) = 3.129$$

$$(FS_B) = 1.5$$






como:

$$(FS_{U4}) > (FS_B)$$

$$3.129 > 1.5$$

lo cual implica que el talud aún es estable.

Es probable que la disminución del valor del Factor de Seguridad haya sido provocada por la existencia de la caverna ubicada en la unidad que le sobreyace.

-  U1 Arenas de grano medio a fino.
-  U2 Arcilla con arena fina.
-  U3 Arena media
-  U4 Arena gruesa
-  U5 Arena fina arcillosa

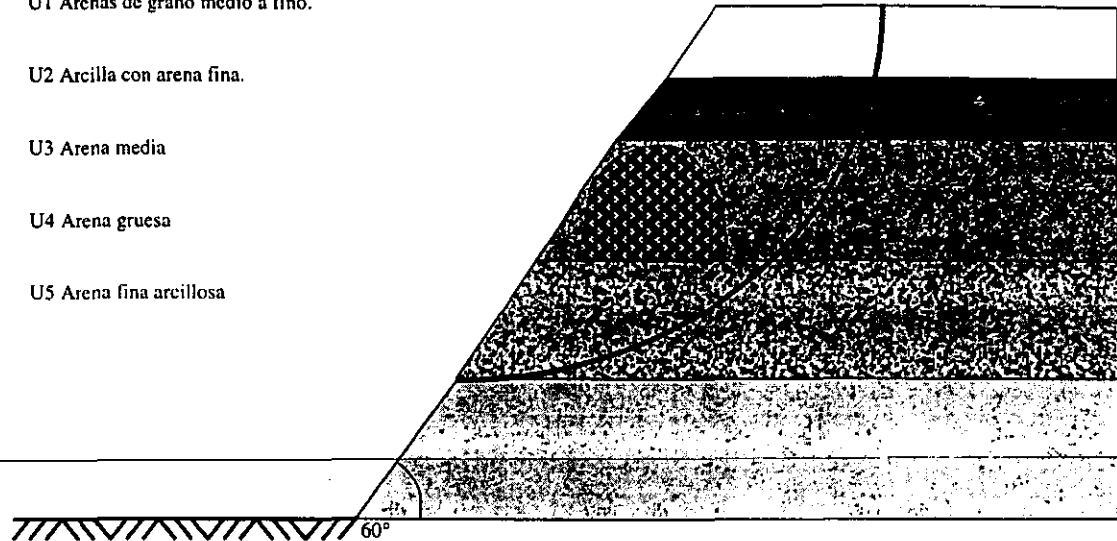


FIG. VI.7 CASO A4) SUPERFICIE POTENCIAL DE FALLA SUPUESTA EN LA UNIDAD LITOLÓGICA 4

TABLA 13 CASO A4 APLICACION DEL METODO DE LAS DOVELAS CON SUPERFICIE POTENCIAL DE FALLA SUPUESTA EN LA UNIDAD LITOLOGICA 4.

DOVELA	AREA (m ²)	W (m)	C (m)	h (m)	W ₁ (m)	W ₂ (m)	W ₃ (m)	W ₄ (m)	W ₅ (m)	W ₆ (m)	W ₇ (m)	W ₈ (m)
1	1.375	1.877	1	28	1.6	9	0.156	0.988	0.294	1.600	0.986	
2	9.9	13.51	1	28	3.1	19	0.326	0.946	4.400	3.100	6.794	
3	3.78	5.672	1	28	1.4	29	0.485	0.875	2.750	1.400	2.638	
4	1.14	1.716	1	28	0.2	35	0.574	0.819	0.984	0.200	0.747	
5	10.04	15.02	8	28	2.1	38	0.616	0.788	9.250	16.800	6.295	
6	13.50	20.47	8	28	3.7	45	0.707	0.707	14.475	29.600	7.696	
7	3.703	5.515	10	10	1.9	54	0.809	0.588	4.461	19.000	0.572	
8	1.235	1.686	8	30	2.7	67	0.921	0.391	1.552	21.600	0.380	
SUMA									38.165	93.300	26.108	

En resumen, diremos que en el talud Norte no aflora ninguna falla circular que pudiera indicar inestabilidad del terreno, pero si es apreciable la presencia de una caverna en la Unidad Litológica Tres (U₃), así como la falta de material al pie del talud (debido a que anteriormente era usado como banco de materiales) y la circulación de vehículos pesados por la corona del mismo.

Al aplicar el Método analítico de las Dovelas para conocer la estabilidad o inestabilidad del terreno, concluimos en base a los resultados obtenidos que el talud es estable con caverna o sin ella (en el supuesto caso de que sea regenerada en su totalidad), aunque se observó que con la existencia de esta y con el peso del trailer que se ha considerado durante el estudio, el Factor de Seguridad disminuye considerablemente.

Se considera por lo tanto; que en este caso la caverna es un elemento de alto riesgo que puede llegar a provocar la inestabilidad del talud si llegara a colapsarse, ya sea por el sobrepeso que pueda soportar, por el reblandecimiento de las paredes y techo o por cualquier otro factor inesperado.

Otro elemento vital que aumenta el riesgo de inestabilidad del talud, es el peso de los trailers y demás vehículos pesados que circulan por sobre la corona del mismo, el cual combinado con la presencia de cavernas, presenta durante el análisis de estabilidad (Método de las Dovelas); valores del Factor de Seguridad muy bajos, (aunque en el fondo continúan indicando que el talud es estable), pero que nos hacen pensar en aplicar medidas drásticas que eleven esos valores del Factor por cualquier contratiempo inesperado que pudiera presentarse en un futuro, evitando así mayores problemas de los ya existentes

• **CASO B**

Este caso corresponde al Talud Poniente: el cual es paralelo a la Calle Seminario. Para un mejor análisis hubo que dividirlo de acuerdo a las características que presentaba el terreno; tales como: la presencia de dos topes vehiculares sobre la corona del talud, la existencia de una caverna en la Unidad Litológica Tres (U_3), la circulación de vehículos automotores pesados (trailers, camiones de volteo y de redilas y microbuses) por sobre la corona del talud y la presencia de una superficie potencial de falla circular concoidea que atraviesa la Calle Seminario y llega hasta el techo de la caverna antes referida.

A continuación se presenta el análisis de cada uno de éstos casos :

CASO B1)

En este análisis se tomaron en consideración únicamente *la existencia de la superficie potencial de falla circular y la inminente presencia de la caverna* hallada en la Unidad Litológica Tres (U_3), como lo muestra la **Fig. VI.8**.

En la aplicación del Método de las Dovelas; fue necesario eliminar (al igual que en los análisis respectivos hechos en el Talud Norte), los valores de la cohesión y la fricción en las dovelas No. 7 y No. 8, debido a que es en ésta área en donde se ubica la caverna y en donde lógicamente no existe material (esta hueco).

El valor del Factor de Seguridad obtenido es igual a 3.737 (**Tabla 14**), lo que indica al compararlo contra el Factor de Seguridad Base ($FS_B = 1.5$); que el talud es estable, pues se tiene lo siguiente:

$$FS_{B1} = 3.737$$

$$FS_B = 1.5$$

como:

$$FS_{B1} > FS_B$$

$$3.737 > 1.5$$

entonces el talud es estable bajo estas condiciones.

CASO B2)

Este caso es semejante al anterior; pues toma en consideración *la presencia de la superficie potencial de falla circular*, pero con la diferencia de que aquí se supone que ya no existe ninguna caverna en la Unidad Tres (U_3), (**Fig. VI.9**).

Esta suposición se hace para llegar a entender el posible comportamiento que pudiese adquirir el talud en caso de ser regenerada (rellena) totalmente la mina. Cabe señalar que debido a esto, las dovelas 7 y 8 tomaron sus respectivos valores de cohesión y fricción, (*Tabla 15*).

Del análisis matemático resulta un valor del Factor de Seguridad de 4.585, el cual es por demás mayor a 1.5 (FS_B), es decir: se tiene que:

$$FS_{B2} = 4.585$$

$$FS_B = 1.5$$

y como:

$$FS_{B2} > FS_B$$

$$4.585 > 1.5$$

entonces el talud sigue siendo estable, aunque cabe hacer la observación de que este Factor de Seguridad obtenido es mayor al caso anterior (Caso B1), debido probablemente a que en el primero se hizo el análisis considerando la presencia de la caverna y en éste último no.

Concluimos en base a lo anterior que efectivamente la caverna es un elemento que requiere mayor atención, pues provoca considerable disminución en los valores del Factor de Seguridad.

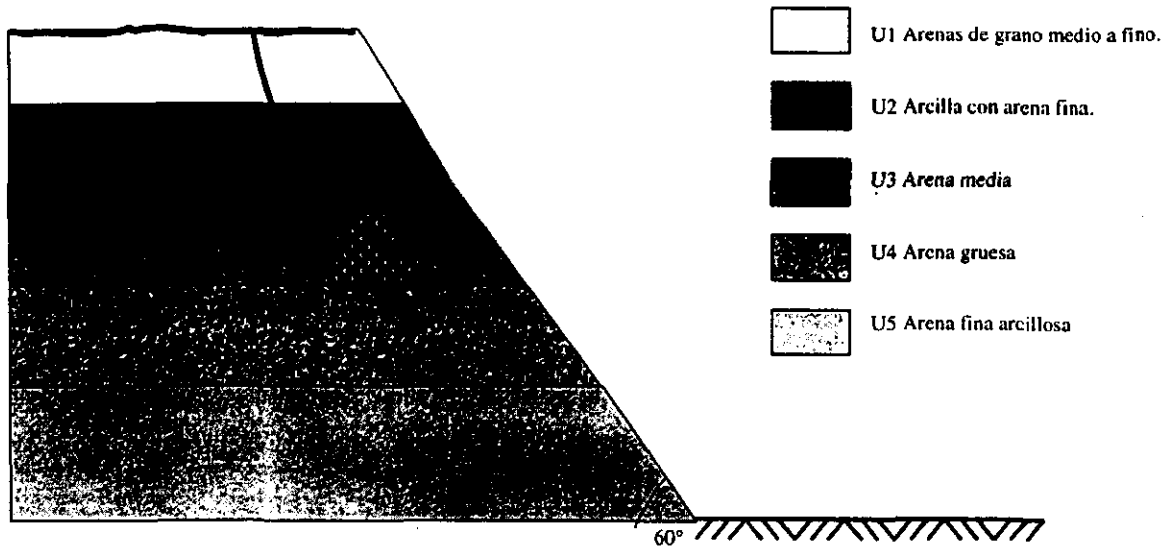


FIG. VI.8 CASO B1) SUPERFICIE POTENCIAL DE FALLA EN LA UNIDAD LITOLÓGICA 3, *CON CAVERNA*

TABLA 14 CASO B1 APLICACION DEL METODO DE LAS DOVELAS CON SUPERFICIE POTENCIAL DE FALLA EN LA UNIDAD LITOLOGICA 3, CON CAVERNA.

DOVELA	AREA (m ²)	W (Ton/m)	c (Ton/m ²)	φ (°)	L (m)	α (°)	sen α	cos α	W sen α	E·C	W cos α · tan φ
1	0.865	1.18	8	30	2.6	73	0.956	0.292	1.128	20.800	0.199
2	2.898	4.316	10	10	1.8	59	0.857	0.515	3.699	18.000	0.392
3	6.748	10.33	8	28	2.2	50	0.766	0.643	7.914	17.600	3.531
4	10.18	15.22	8	28	2.0	35	0.574	0.819	8.728	16.000	6.627
5	11.09	16.65	8	28	1.9	26	0.438	0.899	7.300	15.200	7.958
6	5.16	7.523	8	28	1.2	15	0.259	0.966	1.947	9.600	3.864
7	4.40	6.006	0	0	1.6	12	0.208	0.978	1.249	0	0
8	1.17	1.597	0	0	1.3	3	0.052	0.999	0.084	0	0
SUMA									32.049	97.200	22.572
										FS =	3.737



FIG. VI.9 CASO B2) SUPERFICIE POTENCIAL DE FALLA EN LA UNIDAD LITOLÓGICA 3, SIN CAVERNA

TABLA 15 CASO B2 APLICACION DEL METODO DE LAS DOVELAS CON SUPERFICIE POTENCIAL DE FALLA EN LA UNIDAD LITOLOGICA 3, SIN CAVERNA.

DOVELA	AREA (m ²)	W (Ton/m)	C (Ton/m)	α (°)	L (m)	β (°)	sen α	cos α	W sen α	L * C	W cos α * tan α
1	0.865	1.18	8	30	2.6	73	0.956	0.292	1.128	20.800	0.199
2	2.898	4.316	10	10	1.8	59	0.857	0.515	3.699	18.000	0.392
3	6.748	10.33	8	28	2.2	50	0.766	0.643	7.914	17.600	3.531
4	10.18	15.22	8	28	2.0	35	0.574	0.819	8.728	16.000	6.627
5	11.09	16.65	8	28	1.9	26	0.438	0.899	7.300	15.200	7.958
6	5.16	7.523	8	28	1.2	15	0.259	0.966	1.947	9.600	3.864
7	4.40	6.006	8	28	1.6	12	0.208	0.978	1.249	12.800	3.124
8	1.17	1.597	8	28	1.3	3	0.052	0.999	0.084	10.400	0.848
SUMAS									32.049	120.400	26.544
										FS =	4.585

ASO B3)

Para el estudio correspondiente a este caso se tomaron en cuenta tres factores importantes: 1.- *Presencia de una superficie potencial de falla circular*, 2.-*Existencia de una caverna en la Unidad Litológica Tres (U₃)* y 3.- *El peso estimado de un tractocamión con una caja de 12 metros de longitud y con carga (35 Toneladas aproximadamente) que circula por la corona del talud, (Fig. VI.10).*

En este análisis y en el Caso B5 en donde el estudio se hace con la existencia de la caverna, las dovelas 7 y 8 tendrán valores de cero en la cohesión y en la fricción igual que en el caso B1.

En la aplicación del Método de las Dovelas se obtuvo un valor del Factor de Seguridad de 2.238 (*Tabla 16*). Este valor es mayor a 1.5 y nos coloca dentro del rango de estabilidad, es decir:

$$\begin{aligned}FS_{B3} &= 2.238 \\FS_B &= 1.5\end{aligned}$$

debido a que:

$$\begin{aligned}FS_{B3} &> FS_B \\2.238 &> 1.5\end{aligned}$$

entonces el talud estudiado continua siendo estable bajo las condiciones ya mencionadas.

CASO B4)

Este análisis es idéntico al caso anterior (Caso B3), y únicamente se diferencia de aquel en que aquí *se establece que en la Unidad Tres (U₃) no existe ninguna caverna (Fig. VI.11)*, es decir; que la oquedad que existió en determinado momento ya fue totalmente rellena (esto supone este caso).

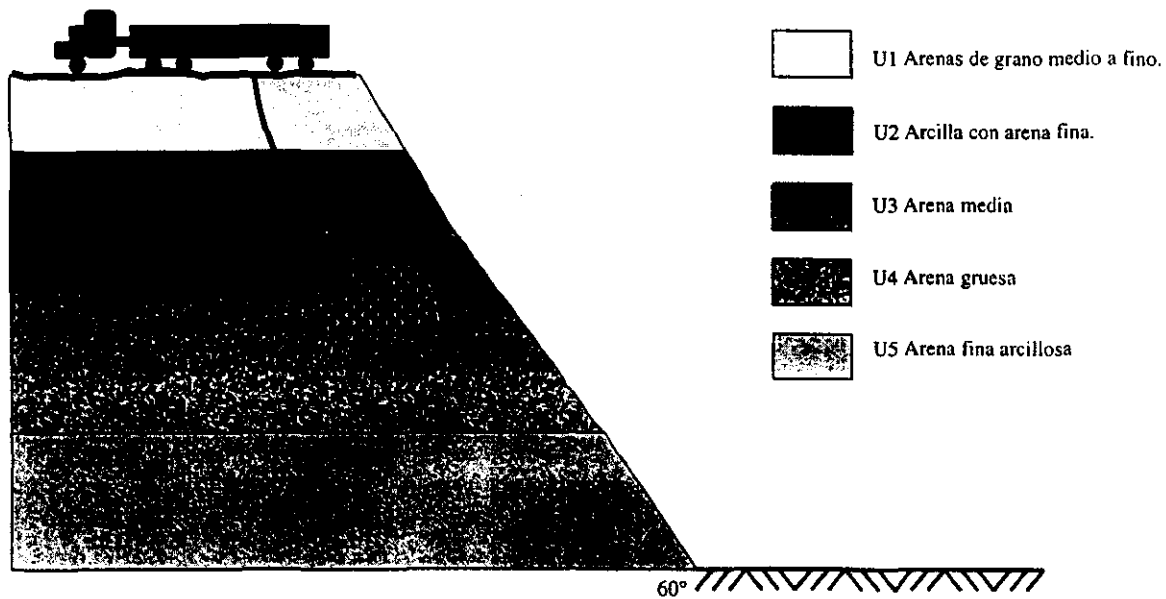
En el análisis cuantitativo correspondiente, la cohesión y la fricción en las dovelas 7 y 8 vuelven a tomar sus valores, como se muestra en la *Tabla 17*, la cual presenta a la vez el Factor de Seguridad que se obtuvo (2.70), el cual nuevamente nos coloca dentro del rango de estabilidad para el talud en estudio. En resumen tenemos lo siguiente:

$$\begin{aligned}FS_{B4} &= 2.70 \\FS_B &= 1.5\end{aligned}$$

debido a que:

$$\begin{aligned} FS_{B4} &> FS_B \\ 2.70 &> 1.5 \end{aligned}$$

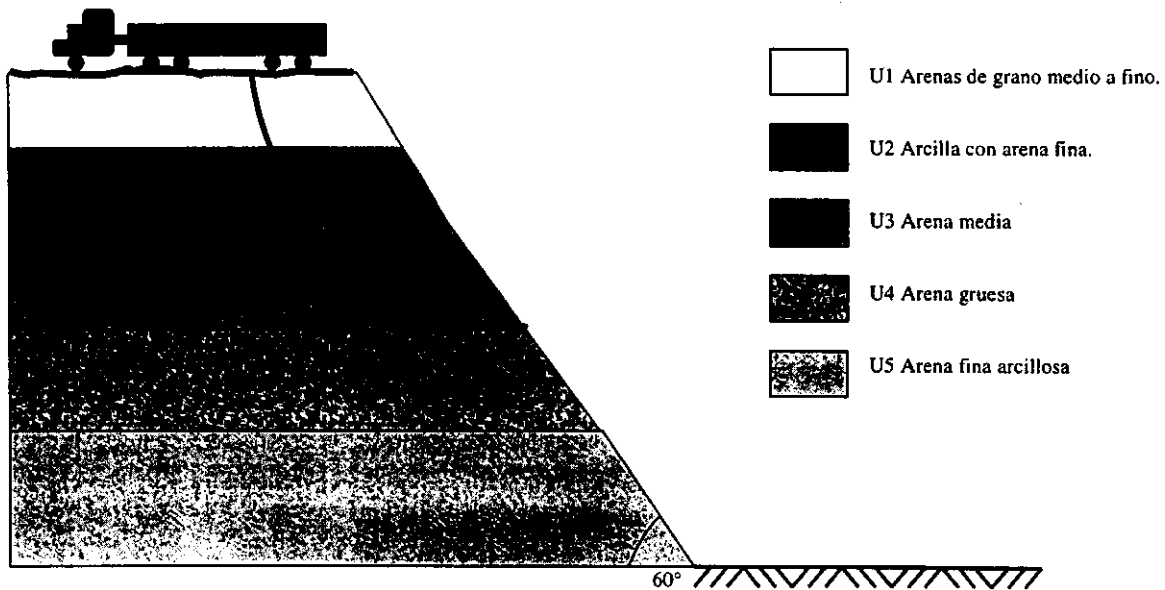
se concluye finalmente que el talud es estable, aunque es notorio el descenso del valor del Factor de Seguridad cuando en el análisis se incluye la caverna y se auna el peso del trailer. Esto se puede apreciar mejor al comparar el Factor de Seguridad del Caso B3 contra el del Caso B4.



**FIG. VI.10 CASO B3) SUPERFICIE DE FALLA EN LA UNIDAD LITOLÓGICA 3,
CON CAVERNA Y CON PESO DE TRAILER**

TABLA 16 CASO B3 APLICACION DEL METODO DE LAS DOVELAS CON SUPERFICIE POTENCIAL DE FALLA EN LA UNIDAD LITOLÓGICA 3, CON CAVERNA Y CON PESO DEL TRAILER.

DOVELA	AREA (m^2)	W (Ton/m)	C (Ton/m ²)	α (°)	L (m)	β (°)	sen •	cos •	W sen •	L*C	W cos • * tan •
1	0.865	1.18	8	30	2.6	73	0.956	0.292	1.128	20.800	0.199
2	2.898	4.316	10	10	1.8	59	0.857	0.515	3.699	18.000	0.392
3	6.748	45.33	8	28	2.2	50	0.766	0.643	34.725	17.600	15.493
4	10.18	15.22	8	28	2.0	35	0.574	0.819	8.728	16.000	6.627
5	11.09	16.65	8	28	1.9	26	0.438	0.899	7.300	15.200	7.958
6	5.16	7.523	8	28	1.2	15	0.259	0.966	1.947	9.600	3.864
7	4.40	6.006	0	0	1.6	12	0.208	0.978	1.249	0	0
8	1.17	1.597	0	0	1.3	3	0.052	0.999	0.084	0	0
SUMA									58.861	97.200	34.534
										FS = 2.238	



**FIG. VI.11 CASO B4) SUPERFICIE DE FALLA EN LA UNIDAD LITOLÓGICA 3,
SIN CAVERNA Y CON PESO DE TRAILER**

TABLA 17 CASO B4 APLICACION DEL METODO DE LAS DOVELAS CON SUPERFICIE POTENCIAL DE FALLA EN LA UNIDAD LITOLÓGICA 3, SIN CAVERNA Y CON PESO DEL TRAILER.

DOVELA	AREA (m ²)	W (Ton/m)	C (Ton/m ²)	α (°)	D (m)	β (°)	sen •	cos •	W sen •	L*C	W cos • * tan •
1	0.865	1.18	8	30	2.6	73	0.956	0.292	1.128	20.800	0.199
2	2.898	4.316	10	10	1.8	59	0.857	0.515	3.699	18.000	0.392
3	6.748	45.33	8	28	2.2	50	0.766	0.643	34.725	17.600	15.493
4	10.18	15.22	8	28	2.0	35	0.574	0.819	8.728	16.000	6.627
5	11.09	16.65	8	28	1.9	26	0.438	0.899	7.300	15.200	7.958
6	5.16	7.523	8	28	1.2	15	0.259	0.966	1.947	9.600	3.864
7	4.40	6.006	8	28	1.6	12	0.208	0.978	1.249	12.800	3.124
8	1.17	1.597	8	28	1.3	3	0.052	0.999	0.084	10.400	0.848
SUMA									58.861	120.400	38.506
										FS =	2.70

CASO B5)

En lo que respecta a este análisis, se tomaron en cuenta cuatro factores importantes presentes en el talud: 1.- *Existencia de una superficie potencial de falla* que va desde la corona hasta el techo de la caverna, 2.- *Presencia de la caverna* en la Unidad Tres (U₃), 3.- *Peso del trailer cargado* (35 toneladas) y 4.- *El 20 % de impacto* o vibración generado por el trailer (y por los demás vehículos pesados) al librar los topes vehiculares que están sobre la corona del talud (Calle Seminario), (*Fig. VI.12*).

Durante la aplicación del Método de las Dovelas, se omitieron nuevamente los valores de la cohesión y la fricción y se llegó a la correcta obtención del Factor de Seguridad de este caso (2.087), tal y como se muestra en la *Tabla 18*. Al comparar este valor contra el Factor de Seguridad Base; observamos que el primero es mayor a este último y por lo tanto tenemos que el talud continua siendo estable.

Resumiendo, tenemos lo siguiente:

$$\begin{aligned}FS_{B5} &= 2.087 \\FS_B &= 1.5\end{aligned}$$

debido a que:

$$\begin{aligned}FS_{B5} &> FS_B \\2.087 &> 1.5\end{aligned}$$

se concluye que el talud continua estable.

CASO B6)

Este caso se analizó de manera idéntica al Caso B5, con la salvedad de que ahora *no se toma en cuenta la presencia de ninguna caverna*, debido a que se supuso que esta fue rellena totalmente para conocer el posible comportamiento mecánico del talud bajo esta condición (*Fig. VI.13*).

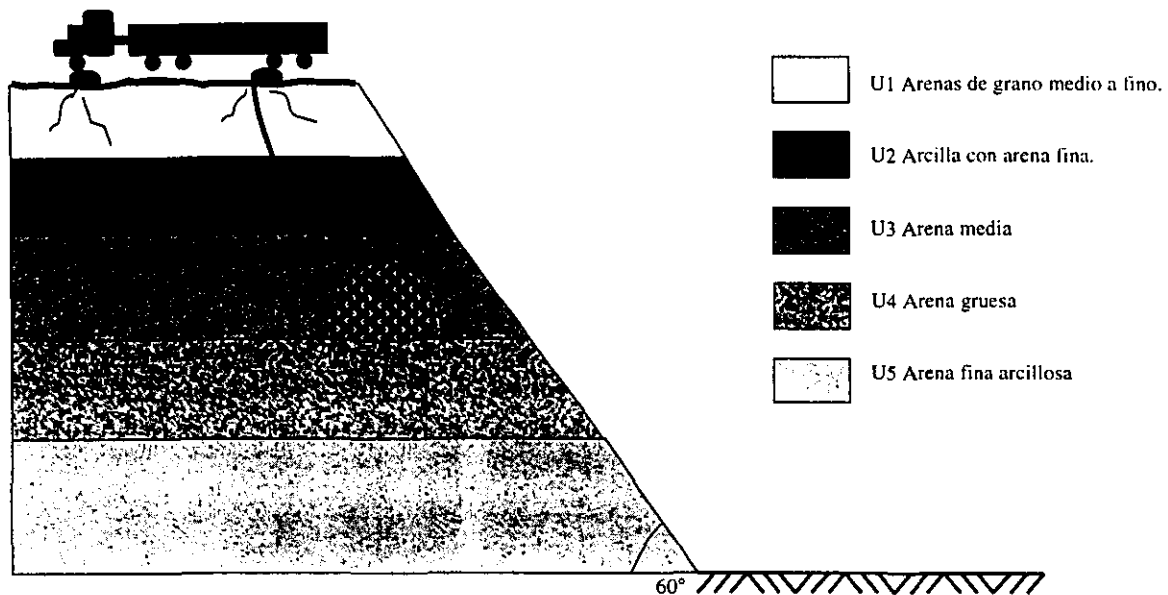
La correcta aplicación hecha del Método analítico proporcionó un Factor de Seguridad de 2.512 (*Tabla 19*); el cual comparado contra el valor de 1.5 nos permite establecer que el talud bajo estas condiciones resulta ser estable. Tenemos así lo siguiente:

$$\begin{aligned}FS_{B6} &= 2.512 \\FS_B &= 1.5\end{aligned}$$

como:

$$\begin{aligned}FS_{B6} &> FS_B \\2.512 &> 1.5\end{aligned}$$

entonces la estabilidad en el talud continua perdurando, aunque a razón de comentario diremos que la presencia de la caverna combinada con el peso del trailer y con el impacto generado por éste en el cuerpo del talud al librar los topes arrojan un Factor de Seguridad muy bajo. No así en el caso en que se suponga que no exista caverna. Esto nos lleva a concluir que el elemento más problemático para la estabilidad del talud es la inminente presencia de la caverna.



**FIG. VI.12 CASO B5) SUPERFICIE POTENCIAL DE FALLA EN LA UNIDAD LITOLÓGICA 3,
CON CAVERNA, CON PESO DE TRAILER Y CON IMPACTO**

TABLA 18 CASO B5 APLICACION DEL METODO DE LAS DOVELAS CON SUPERFICIE POTENCIAL DE FALLA EN LA UNIDAD LITOLÓGICA 3, CON CAVERNA Y CON PESO DEL TRAILER E IMPACTO.

DOVELA	AREA (m^2)	W (Ton/m)	G (Ton/m ²)	α ($^\circ$)	L _m (m)	β ($^\circ$)	sen α	cos α	Wsen α	L _m C	Wcos α * tan β
1	0.865	1.18	8	30	2.6	73	0.956	0.292	1.128	20.800	0.199
2	2.898	4.316	10	10	1.8	59	0.857	0.515	3.699	18.000	0.392
3	6.748	52.33	8	28	2.2	50	0.766	0.643	40.087	17.600	17.785
4	10.18	15.22	8	28	2.0	35	0.574	0.819	8.728	16.000	6.627
5	11.09	16.65	8	28	1.9	26	0.438	0.899	7.300	15.2000	7.958
6	5.16	7.523	8	28	1.2	15	0.259	0.966	1.947	9.600	3.864
7	4.40	6.006	0	0	1.6	12	0.208	0.978	1.249	0	0
8	1.17	1.597	0	0	1.3	3	0.052	0.999	0.084	0	0
SUMA									64.222	97.200	36.826
										FS =	2.087

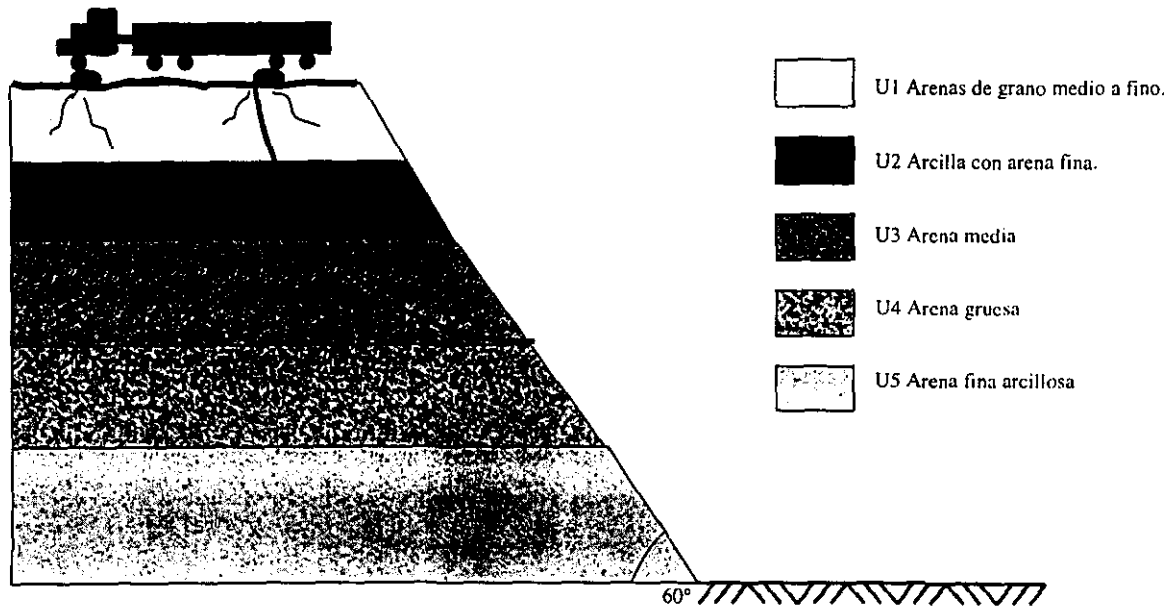


FIG. VI.13 CASO B6) SUPERFICIE POTENCIAL DE FALLA EN LA UNIDAD LITOLÓGICA 3, SIN CAVERNA, CON PESO DE TRAILER Y CON IMPACTO

TABLA 19 CASO B6 APLICACION DEL METODO DE LAS DOVELAS CON SUPERFICIE POTENCIAL DE FALLA EN LA UNIDAD LITOLÓGICA 3, SIN CAVERNA Y CON PESO DEL TRAILER E IMPACTO.

DOVELA	AREA (m ²)	W (Ton / m)	C (Ton / m ²)	• (°)	L (m)	• (°)	sen •	cos •	W sen •	L*C	W cos • * tan •
1	0.865	1.18	8	30	2.6	73	0.956	0.292	1.128	20.800	0.199
2	2.898	4.316	10	10	1.8	59	0.857	0.515	3.699	18.000	0.392
3	6.748	52.33	8	28	2.2	50	0.766	0.643	40.087	17.600	17.785
4	10.18	15.22	8	28	2.0	35	0.574	0.819	8.728	16.000	6.627
5	11.09	16.65	8	28	1.9	26	0.438	0.899	7.300	15.2000	7.958
6	5.16	7.523	8	28	1.2	15	0.259	0.966	1.947	9.600	3.864
7	4.40	6.006	8	28	1.6	12	0.208	0.978	1.249	12.800	3.124
8	1.17	1.597	8	28	1.3	3	0.052	0.999	0.084	10.400	0.848
SUMA									64.222	120.400	40.898
									FS = 2.512		

Resumiendo, en base a la información de los trabajos previos de la zona de estudio y a los resultados obtenidos con la aplicación del Método de las Dovelas en el talud conocido como "El Cantil", ubicado en el Municipio de Tlalnepantla de Baz, Estado de México, se hace una interpretación final que a continuación se presenta, aunque para ello se considera necesario en primer lugar enumerar los factores condicionantes que desafortunadamente están presentes en el terreno y que ya han provocado severos conflictos de inestabilidad al talud:

1. Existencia de una superficie potencial de falla que afecta a la Calle Seminario (la cual atraviesa perpendicularmente) y que corre a través del cuerpo del talud hasta el techo de una caverna localizada en la Unidad Litológica Tres (U₃).
2. Presencia de una caverna (zona minada) en la Unidad Tres (U₃).
3. Existencia de dos topes vehiculares en la Calle Seminario (corona del talud).
4. Circulación de tránsito pesado (trailers, microbuses, camiones de redilas y de volteo) y vehículos ligeros (tránsito local) sobre la corona del talud.
5. Sobreplación en la zona de conflicto.
6. El talud y gran parte de las Colonias circundantes están afectadas por una gran zona minada considerada de alto riesgo.
7. Inexistencia u omisión por parte de los Colonos y de las autoridades para seguir un adecuado plan de construcción de viviendas en las Colonias afectadas y sus alrededores.
8. Generación de taludes casi verticales, debidos a la explotación a cielo abierto que se llevó a cabo sin control, ni planeación alguna.
9. Sobre peso en la corona del talud; generado por la circulación de vehículos pesados sobre ella y por la aparición de viviendas con más de dos niveles

Escasa colaboración informativa por parte de los habitantes del lugar (probablemente se deba al temor de proporcionar información que haga que las autoridades los reubiquen en cualquier otro lugar). La mayor parte de estos factores están íntimamente relacionados con los resultados que se obtuvieron en la aplicación del Método de las Dovelas, como se puede apreciar a continuación:

En el Talud Norte (Caso A), se observa que el valor del Factor de Seguridad que se obtuvo al considerar la existencia de la caverna en la Unidad Litológica Tres (*Caso A3.1*), disminuyó en un 19.1 % aproximadamente; en relación al valor obtenido cuando el análisis se hizo omitiendo a ésta (*Caso A3.2*).

Se concluye que la presencia de la mina reduce de manera importante la estabilidad del talud.

De igual forma, la disminución que hubo entre el Factor de Seguridad que fue obtenido en el Caso A3.3 (estudio con caverna y con el peso de un trailer cargado -35 ton-) y el Caso A3.4 (estudio sin caverna, pero con el peso del mismo trailer), fue de alrededor de 17 %.

Concluimos entonces; que el peso del trailer afecta al Factor de Seguridad reduciéndolo en forma importante, pero sobretodo cuando se considera conjuntamente con la existencia de la mina, por lo que se tiene que ambos factores en conjunto actúan negativamente en el talud.

Finalmente; diremos que en este talud es necesario regenerar totalmente la zona minada para evitar mayores problemas de inestabilidad, así como también será de vital importancia prohibir estrictamente el tránsito de vehículos pesados en la corona del talud.

Por otra parte, *en el Talud Poniente (Caso B)*; se observa que la caverna que se encuentra en la Unidad Tres (U₃) al igual que en el Caso A, influye negativamente en la estabilidad del terreno, pues hubo una reducción del 18.4 % en el Factor de Seguridad cuando el análisis la incluyó (*Caso B1*), en comparación a cuando no fue así (*Caso B2*).

De igual forma; el Factor de Seguridad obtenido cuando se consideró a la caverna y al peso del trailer cargado (*Caso B3*) disminuyó un 17.1 %, en relación al valor arrojado por el Método de las Dovelas cuando el análisis se hizo omitiendo a la mina pero no al peso del trailer (*Caso B4*).

La conclusión que se obtuvo de esto es: que la mina es desafortunadamente un elemento de alto riesgo que al combinarse con el peso del trailer que circula por sobre la corona del talud afectan inminentemente la estabilidad del mismo.

Por último podemos decir que la reducción que hubo del Factor de Seguridad cuando en el estudio se consideró un 20 % de impacto generado por vibración (*Caso B5*) fue la más drástica que hubo en todo el análisis (16.9 %). Esto nos lleva a pensar que la circulación de los vehículos pesados por sobre las zonas minadas es demasiado peligrosa, pero lo es más aún cuando se produce el impacto y la vibración sobre el cuerpo del talud una vez que los neumáticos libran los topes que están en la Calle Seminario.

La conclusión final que obtuvimos en base a todo lo anterior es que en este talud; deberá regenerarse en primera instancia la zona minada para evitar colapsos y derrumbes que generen mayores problemas de inestabilidad. También será de vital importancia prohibir definitivamente la circulación de vehículos pesados por la Calle Seminario y

Continuación de Seminario, así como también la eliminación de los topes, evitándose así el mínimo de vibraciones en la zona de conflicto.

Finalmente, la solución que proponemos en este trabajo es la siguiente:

Colocar material de relleno desde la corona del talud y hasta el pie del mismo, distribuyéndolo uniformemente con una pendiente aproximada de 45° , esto con la finalidad de proporcionarle mayor soporte a toda la estructura.

Para fundamentar esta alternativa de solución que propusimos, nuevamente hubo la necesidad de hacer un análisis del talud aplicando el Método de las Dovelas; pretendiendo conocer el nuevo comportamiento que tendría el terreno al agregarle soporte a la estructura con el material de relleno.

En el primer análisis se incluyeron los siguientes factores:

1. Talud con relleno sugerido (Material tendido a 45° aproximadamente).
2. Peso del trailer con carga (alrededor de 35 Toneladas).
3. 20 % de impacto generado por los vehículos pesados al librar los topes vehiculares colocados en la corona del talud y
4. Presencia de la caverna en la Unidad Litológica Tres (U_3).

La **Fig. VI.14** muestra las nuevas condiciones imperantes en el talud. La **Tabla 20** por su parte, indica que las dovelas 16 y 17 presentan valores de cero en la cohesión y en la fricción; por ser precisamente estas zonas, las afectadas por la mina. También es mostrado que el valor del Factor de Seguridad Obtenido con estas nuevas condiciones del talud es por demás; mayor al valor de 1.5.

Tenemos entonces que:

$$\begin{aligned}FS_{\text{SOLUCION CON CAVERNA}} &= 3.474 \\FS_B &= 1.5\end{aligned}$$

y como

$$\begin{aligned}FS_{\text{SOLUCION CON CAVERNA}} &> FS_B \\3.474 &> 1.5\end{aligned}$$

entonces el talud sigue siendo estable.

Con estos resultados, demostramos que el talud con el relleno que hemos sugerido si es estable.

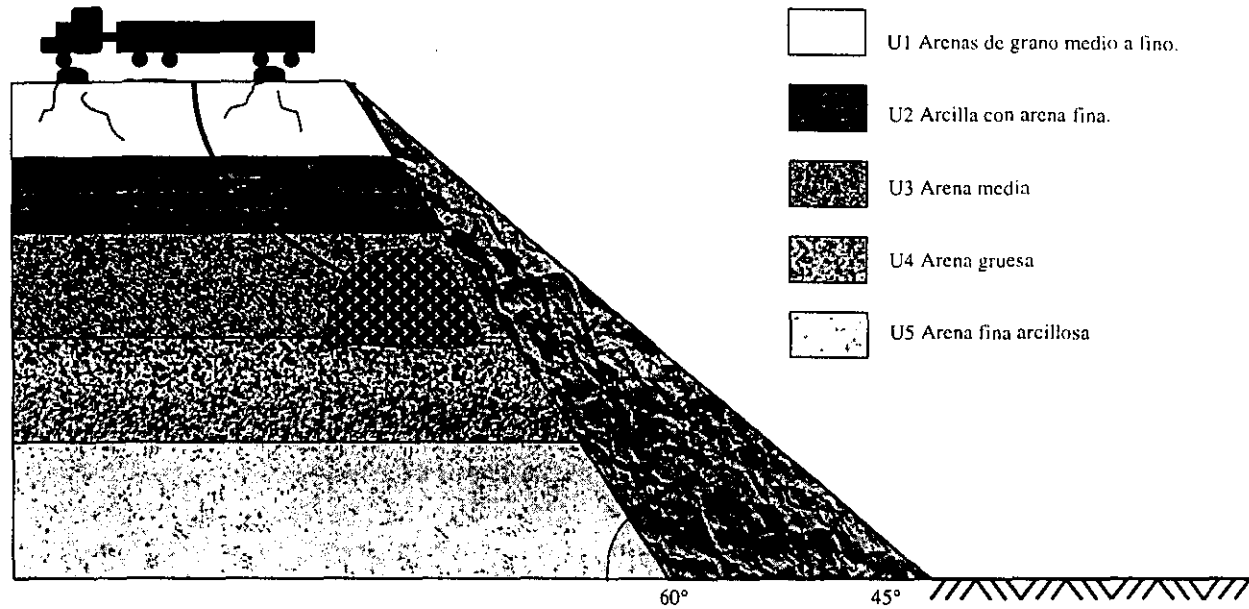


FIG. VI.14 SOLUCION PROPUESTA, CON TALUD TENDIDO A 45°, CON CAVERNA, CON PESO DE TRAILER Y CON IMPACTO

TABLA 20 SOLUCION PROPUESTA CON LA APLICACION DEL METODO DE LAS DOVELAS, CON RELLENO SUGERIDO, CON PESO DE TRAILER, CON IMPACTO Y CON CAVERNA.

DOVELA	AREA (m ²)	W (Ton/m)	C (Ton/m ²)	α (°)	β (°)	γ (°)	cos α	cos β	Wsen α	Wcos α	Wcos β	Wcos γ
1	0.36	0.491	8	30	1.65	82	0.990	0.139	0.487	13.200	0.039	
2	0.585	0.799	8	30	0.80	72	0.951	0.309	0.760	6.400	0.142	
3	0.638	42.890	10	10	0.50	60	0.866	0.500	37.144	5.00	3.78	
4	2.01	3.031	10	10	1.4	61	0.875	0.485	2.651	14.000	0.259	
5	1.025	1.599	8	28	0.5	55	0.819	0.574	1.310	4.000	0.488	
6	5.663	8.651	8	28	1.65	45	0.707	0.707	6.117	13.200	3.253	
7	1.71	2.574	8	28	0.5	42	0.669	0.743	1.722	4.000	1.017	
8	6.95	10.38	8	28	1.9	34	0.559	0.829	5.807	15.200	4.578	
9	4.025	7.433	8	28	0.7	25	0.423	0.906	3.141	5.600	3.582	
10	1.56	6.596	8	28	0.7	19	0.326	0.946	2.148	5.600	3.316	
11	0.59	7.121	8	28	0.8	17	0.292	0.956	2.082	6.400	3.621	
12	1.264	2.395	8	28	0.2	16	0.276	0.961	0.660	1.600	1.224	
13	6.078	10.64	8	28	0.9	14	0.242	0.970	2.573	7.200	5.488	
14	3.18	5.072	8	28	0.4	10	0.174	0.985	0.881	3.200	2.656	
15	6.660	10.81	8	28	0.9	9	0.156	0.988	1.692	7.200	5.679	
16	6.51	10.73	0	0	0.8	4	0.070	0.998	0.749	0	0	
17	8.193	13.75	0	0	1.2	8	0.139	0.990	1.913	0	0	
18	6.73	9.72	5	30	1.0	-13	-0.225	0.974	-2.187	5.000	5.468	
19	5.75	10.35	5	30	1.0	-14	-0.242	0.970	-2.504	5.000	5.798	
20	2.70	3.564	5	30	0.4	-18	-0.309	0.951	-1.101	2.00	1.957	
21	9.155	16.48	5	30	2.2	-19	-0.326	0.946	-5.365	11.000	8.996	
22	2.225	4.005	5	30	1.1	-31	-0.515	0.857	-2.063	5.500	1.982	
SUMA									58.616	140.300	63.324	
												RS= 3474

Veamos ahora el segundo análisis.

Este fue idéntico al anterior, con la salvedad de que *ahora no se considera la presencia de la caverna* (suponiendo que la mina haya sido regenerada en su totalidad), ver **Fig. VI.15**.

En este caso, los valores de la cohesión y la fricción en las dovelas 16 y 17 han dejado de ser cero y han tomado sus valores reales, pues se está considerando que no hay oquedades. Por su parte, el valor del Factor de Seguridad obtenido fue de 3.967 (**Tabla 21**), que resulta ser poco menor del doble del Factor de seguridad Base ($FS_B=1.5$).

Resumiendo tenemos:

$$\begin{aligned} FS_{\text{SOLUCION SIN CAVERNA}} &= 3.967 \\ FS_B &= 1.5 \end{aligned}$$

y como:

$$\begin{aligned} FS_{\text{SOLUCION SIN CAVERNA}} &> FS_B \\ 3.967 &> 1.5 \end{aligned}$$

entonces el talud propuesto, nuevamente resulta ser estable y confiable para los habitantes de la zona afectada.

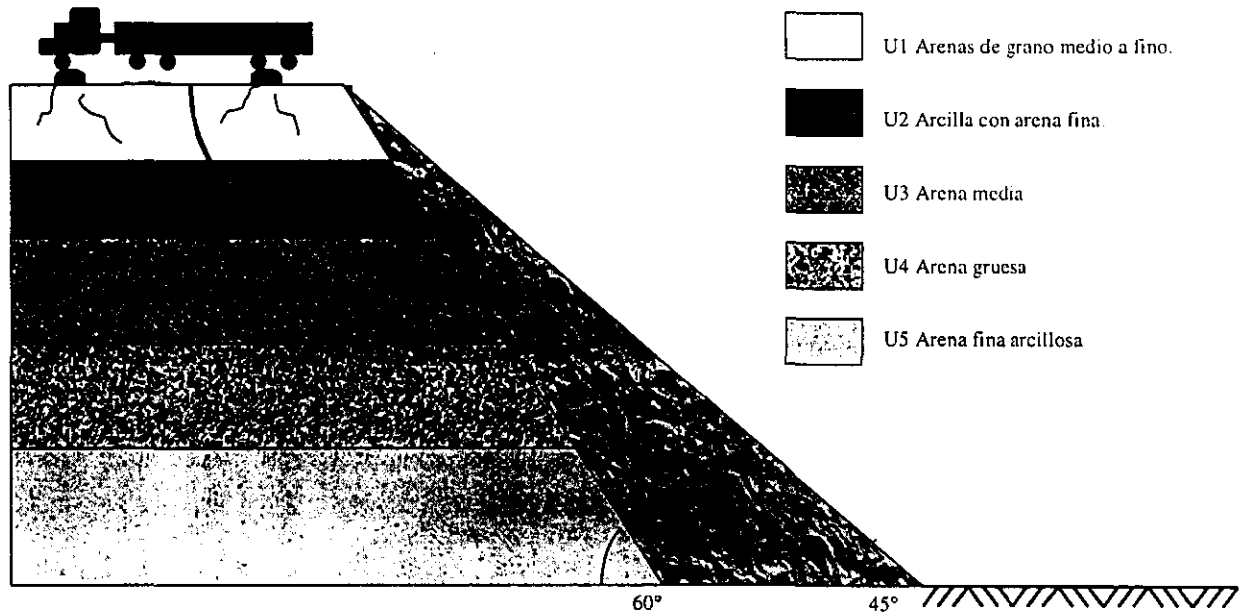


FIG. VI.15 SOLUCION PROPUESTA, CON TALUD TENDIDO A 45°, SIN CAVERNA, CON PESO DE TRAILER Y CON IMPACTO

TABLA 21 SOLUCION PROPUESTA CON LA APLICACION DEL METODO DE LAS DOVELAS, CON RELLENO SUGERIDO, CON PESO DE TRAILER, CON IMPACTO Y SIN CAVERNA.

DOVELA	AREA (m ²)	W (Ton/m)	C (Ton/m ²)	α (°)	L (m)	β (°)	sen β	cos β	Wsen β	L*C	Wcos β * tan α
1	0.36	0.491	8	30	1.65	82	0.990	0.139	0.487	13.200	0.039
2	0.585	0.799	8	30	0.80	72	0.951	0.309	0.760	6.400	0.142
3	0.638	42.890	10	10	0.50	60	0.866	0.500	37.144	5.00	3.781
4	2.01	3.031	10	10	1.4	61	0.875	0.485	2.651	14.000	0.259
5	1.025	1.599	8	28	0.5	55	0.819	0.574	1.310	4.000	0.488
6	5.663	8.651	8	28	1.65	45	0.707	0.707	6.117	13.200	3.253
7	1.71	2.574	8	28	0.5	42	0.669	0.743	1.722	4.000	1.017
8	6.95	10.38	8	28	1.9	34	0.559	0.829	5.807	15.200	4.578
9	4.025	7.433	8	28	0.7	25	0.423	0.906	3.141	5.600	3.582
10	1.56	6.596	8	28	0.7	19	0.326	0.946	2.148	5.600	3.316
11	0.59	7.121	8	28	0.8	17	0.292	0.956	2.082	6.400	3.621
12	1.264	2.395	8	28	0.2	16	0.276	0.961	0.660	1.600	1.224
13	6.078	10.64	8	28	0.9	14	0.242	0.970	2.573	7.200	5.488
14	3.18	5.072	8	28	0.4	10	0.174	0.985	0.881	3.200	2.656
15	6.660	10.81	8	28	0.9	9	0.156	0.988	1.692	7.200	5.679
16	6.51	10.73	8	28	0.8	4	0.070	0.998	0.749	0.750	6.400
17	8.193	13.75	8	28	1.2	8	0.139	0.990	1.913	1.910	9.600
18	6.73	9.72	5	30	1.0	-13	-0.225	0.974	-2.187	5.000	5.468
19	5.75	10.35	5	30	1.0	-14	-0.242	0.970	-2.504	5.000	5.798
20	2.70	3.564	5	30	0.4	-18	-0.309	0.951	-1.101	2.00	1.957
21	9.155	16.48	5	30	2.2	-19	-0.326	0.946	-5.365	11.000	8.996
22	2.225	4.005	5	30	1.1	-31	-0.515	0.857	-2.063	5.500	1.982
SUMA									58.616	156.300	76.225
										FS = 3.967	

CONCLUSIONES

- La estabilidad se realizó considerando una superficie potencial de falla circular debido a que en el sitio, dicha superficie es de este tipo.
- Las fracturas que profundizan en el cuerpo del talud, generan bloques inestables que asociados a zonas debilitadas por la existencia de oquedades, pueden presentar colapsos por efecto de: infiltración de agua pluvial, peso excesivo de las construcciones y vibraciones generadas por el tránsito de unidades pesadas al librar los topes vehiculares colocados sobre la corona del talud.
- Uno de los factores principales que generan inestabilidad del talud, es la presencia de oquedades o cavernas (zonas minadas), lo cual se corrobora con las anomalías registradas en las líneas sísmicas; que indican que la Colonia esta asentada en su mayoría; sobre un gran desarrollo de zonas minadas subterráneas abandonadas, que no han sido regeneradas por permanecer abajo de los inmuebles y permanecer ocultas a la vista de las autoridades correspondientes, por lo que es recomendable que se regeneren adecuadamente a la brevedad posible
- Debido a que los materiales constitutivos del talud descansan discordantemente sobre una capa resistente de roca andesítica (que presenta fuerte buzamiento al suroeste), es probable que tiendan a deslizarse a lo largo de esa superficie de pendiente.
- La estabilidad de los materiales poco consolidados del talud, se vio afectada cuando se inició la explotación de materiales para construcción a través de minas subterráneas en el cuerpo del talud.
- La pendiente natural de reposo y de resistencia de los materiales constitutivos del talud, se alteró con la explotación a cielo abierto, pues esta generó taludes casi verticales dando lugar a la inestabilidad del terreno.
- La superficie potencial de falla circular presente sobre la corona del talud, propicia un deslizamiento del terreno a lo largo de la superficie de falla y a la vez; también genera un movimiento vertical (por colapso), debido a la presencia de la caverna en la Unidad Litológica Tres (U_3), lo cual afecta directamente a las cimentaciones de las viviendas que se ubican sobre las minas.
- El agua pluvial es otro elemento negativo en la estabilidad del talud. Si esta se llega a infiltrar en el terreno, disminuirá la cohesión y la resistencia al esfuerzo cortante de los materiales que conforman al talud, aumentando así la posibilidad de falla.
- Los daños en la estructura de la vivienda ubicada en la esquina de Morelos y Seminario (cuarteaduras en paredes, techo y piso), son debidos a la superficie potencial de falla circular que existe en la segunda calle y a la vez también son debidos al fracturamiento conjugado que generó bloques inestables en el interior del talud; los cuales se colapsan (en forma de graben) debido a que el terreno esta minado. Esto provoca severos daños al interior del talud y al exterior del mismo.

- La sobrecarga generada por las construcciones y por los vehículos que descansa sobre el talud, aumenta el valor de las fuerzas actuantes y sobrepasa el de las fuerzas resistentes, trayendo consigo efectos negativos a la estabilidad del cantil.
- En los resultados obtenidos con la aplicación del Método de las Dovelas, se observa que el Factor de Seguridad obtenido disminuye considerablemente cuando en el análisis se considera a la caverna y por el contrario; aumenta cuando esta es omitida.
- Aunque el talud se considera estable, es necesario observar que la existencia de la mina, los topes en las calles y el sobrepeso, reducen los factores de seguridad obtenidos en el análisis y es posible que los disminuyan tanto (al grado de hacerlo inestable), cuando el agua y/o humedad hagan acto de presencia durante la temporada de lluvias o con alguna fuga de agua en el drenaje (por pequeña que sea). Así, debe tenerse en cuenta que también es importante la repetibilidad de la carga de impacto, la cual no fue posible modelar perfectamente en los análisis realizados.

RECOMENDACIONES

- Crear conciencia en los colonos sobre el problema que los atañe, solo así se logrará tener acceso a las minas que se encuentran debajo de sus inmuebles; para iniciar el proceso de regeneración de las minas y erradicar poco a poco; pero de raíz el problema de inestabilidad ya presente en la zona y rellenar totalmente la zona minada con tepetate para reforzar el cuerpo del talud y darle más soporte.
- En caso de que sea necesario usar costales, se sugiere que estos sean de polietileno o de algún otro material resistente: que no se pudra con el agua para que pueda cumplir su objetivo.
- Colocar material de relleno desde la corona hasta el pie del talud, con una pendiente aproximada de 45 grados, esto con la finalidad de que el talud adopte una posición semejante a al que tenía antes de que la actividad humana lo modificara. Con ello se le dará más soporte a todo el talud evitándose la inestabilidad del material que lo conforma.
- Prohibir definitivamente la circulación de camiones pesados como: trailers, camiones de volteo y microbuses, por sobre la corona del talud; colocándose macetonos y construir portales en las entradas de la colonia para dar cumplimiento a la recomendación anterior.
- Eliminar los topes que se colocaron en la corona del talud, para evitar que se sigan generando impactos y vibraciones en el cuerpo de éste, cuando transiten por allí los automóviles particulares; así como hacer el bacheo correspondiente de la grieta generada por la superficie potencial de falla, la cual también provoca vibraciones al paso de los vehículos.
- Limitar a un cierto nivel las viviendas para evitar la sobrecarga.
- Restringir la construcción de nuevas viviendas en la colonia.
- Revisar periódicamente que el sistema de drenaje en las zonas circundantes al talud; no presente fugas que puedan generar filtraciones de aguas domésticas al interior del mismo y lo debiliten aún más.
- A las autoridades del municipio se les recomienda planear y llevar a cabo un buen programa de urbanización que contemple un estudio geológico detallado que muestre los riesgos geológicos que en un futuro podrían presentar severos problemas económicos, materiales y/o humanos a los colonos y a las autoridades correspondientes.

BIBLIOGRAFIA Y REFERENCIAS

1. Arellano, A. R. "Estratigrafía de la Cuenca de México. MEM." Congreso Científico Mexicano. III, 1953.
2. Bromhead, E. N. "Stability of Slopes". Editorial Blackie Academic & Professional. Second Edition, Great Britain, 1992.
3. Brunsden, O. "The application of System Theory to the Study of Mass Movement. Geologica Applicata e Idrogeologica". University of Bari, First Edition, 1973.
4. Campa, U. F. "Breve Análisis Petrográfico de la Sierra de Guadalupe". Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, I.P.N., México, 1968.
5. Coates, D. F. "Fundamentos de Mecánica de Rocas". Editorial Blume, Tercera Edición, España, 1973.
6. Comisión Federal de Electricidad. "Manual de Diseño de Obras Civiles". Fascículo B.3.1, Instituto de Investigaciones Eléctricas, México.
7. Crespo, V. C. "Mecánica de Suelos y Cimentaciones". Editorial Limusa, Primera Edición, México, 1979.
8. Crespo, V. C. "Vías de Comunicación". Editorial Limusa, Segunda Edición, México, 1982.
9. Demant, A. "Características del eje Neovolcánico Transmexicano y sus problemas de interpretación". Revista del Instituto de Geología de la U.N.A.M., Vol. 2, Num. 2, 1978.
10. Escobar, O. J. "Aspectos Inherentes a la Estabilidad de Taludes". Facultad de Ingeniería, U.N.A.M., México, 1996.
11. Fries, C. Jr. "Geología del estado de Morelos y de partes adyacentes de México y Guerrero. región Central Meridional de México". Instituto de Geología, U.N.A.M., Boletín 60, 1960.
12. Hernández, H. F. y Ramírez, J. H. "Origen, Estratigrafía y Petrografía de la Cuenca de México y Sierras Circundantes". Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, I.P.N., México, 1982.
13. Jiménez, J. A. y Justo, J. L. "Geotecnia y Yacimientos". Editorial Ruclas, Tercera Edición, Madrid, 1981.

14. Juárez, B. E. y Rico, R. A. "Mecánica de Suelos". Tomo II. Editorial Limusa. Séptima Edición. México, 1987.
15. Juárez, B. E. y Rico, R. A. "Mecánica de Suelos". Tomo II. Editorial Limusa, Octava Edición. México, 1989.
16. Lambe, W. T. "Mecánica de Suelos". Editorial Limusa. Octava Edición, México, 1981.
17. Lozano, B. L. "Geología de la Sierra de Guadalupe". Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura. I.P.N., México, 1968.
18. Lozano, V. L. "Reconocimiento de los Riesgos Geológicos y de Carácter Antrópico en la Delegación Tlalpan". Facultad de Ingeniería, U.N.A.M., México, 1997.
19. Mooser, F. "Descripciones detalladas de algunas paradas de la excursión C-9". XX Congreso Geológico Internacional. 1956.
20. Mooser, F. "Bosquejo geológico de la Parte Sur de la Cuenca de México". XX Congreso Geológico Internacional, Libreto Guía excursión C-9, 1962
21. Mooser, F. "Historia Geológica de la Cuenca de México". Tomo I, Memoria de las Obras de Drenaje Profundo del Distrito Federal, Departamento del Distrito Federal, México, 1975.
22. Ordaz, A. A. "Estudio Geológico de un Túnel Para la Conducción de Agua Potable a la Ciudad de México (Barrientos-Cuauhtpec)". Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, I.P.N., México, 1975.
23. Oviedo A. De León. "El conglomerado de Texcoco y el posible origen de la Cuenca de México". Revista del I.M.P., Julio 1970.
24. Real, P. S. y Milán, M. V. "Estudio Geológico Encaminado a Localizar Cavernas o Túneles en Seis Colonias Ubicadas Dentro del Area Poniente de la Ciudad de México". Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, I.P.N., México, 1989.
25. Rico, R. A. y Del Castillo, H. "La Ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres". Editorial Limusa. Octava Edición. México, 1990.
26. Rittman, A. "Volcanoes and their Activity". John Willey and sons, New York, London., 1963.
27. Romero, E. A. "El agua subterránea y su impacto en las zonas minadas de la Delegación Alvaro Obregón". Facultad de Ingeniería. U.N.A.M., México, 1997.

28. Segerstrom, K. "Geología General y Rocas volcánicas del área entre México. D.F. y Huauchinango, Puebla". XX Congreso Geológico Internacional. 1956.
29. Segerstrom, K. "Estratigrafía y Tectónica del Cenozoico entre México D.F. y Zimapan, Hidalgo". XX Congreso Geológico Internacional, Excursiones A-3 y C-1. 1956.
30. Serrano, G. M. "Breve Análisis Geomorfológico del Area Comprendida en la Carta Cuautitlán, Escala 1:50 000 de DETENAL". Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, I.P.N., México. 1979.
31. Sowers, B. G. "Introducción a la Mecánica de Suelos y Cimentaciones". Editorial Limusa, Octava Edición, México, 1994.
32. Taylor, W. D. "Mecánica de Suelos". Compañía Editorial Continental. Segunda Edición, México, 1969.
33. Taylor, W. D. "Fundamentos de la Mecánica de Suelos". Compañía Editorial Continental, Tercera Edición, México, 1968.
34. Terzaghi, K. & Peek, B. "Mecánica de Suelos en la Ingeniería Práctica". Editorial El Ateneo, Segunda edición. España, 1976.
35. Terzaghi, K. "Mechanisms of landslides". Geological Society American, Berkey, 1950.
36. Tovar, G. E. "Detección de Cavidades por Medio de Sondeos Eléctricos en el Poniente de la Ciudad de México". Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, I.P.N., México, 1987.
37. Zeevaert, L. "Estratigrafía y problemas de ingeniería en los depósitos de arcilla lacustre de la Ciudad de México". Revista de Ingeniería, Vol. 25, Num. 1, 1952.