



UNIVERSIDAD NACIONAL
DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

ESTUDIO DE ESTABILIDAD DE TALUDES ROCOSOS Y TRATAMIENTOS
DE ESTABILIZACION EN LA PARTE ORIENTAL DE LA SIERRA DE
GUADALUPE (MUNICIPIOS DE ECATEPEC Y TLALNEPANTLA)

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
I N G E N I E R O C I V I L
P R E S E N T A :
D A N I E L V A Z Q U E Z L E Y V A

DR. ARMANDO GARCIA PALOMO: DIRECTOR DE TESIS

MEXICO, D. F.

2005



m343403



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

FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCIÓN
FING/DCTG/SEAC/UTIT/033/04

Señor
DANIEL VÁZQUEZ LEYVA
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor DR. ARMANDO GARCÍA PALOMO, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

"ESTUDIO DE ESTABILIDAD DE TALUDES ROCOSOS Y TRATAMIENTOS DE ESTABILIZACIÓN EN LA PARTE ORIENTAL DE LA SIERRA DE GUADALUPE (MUNICIPIOS DE ECATEPEC Y TLALNEPANTLA).

- INTRODUCCIÓN
- I. GEOGRAFÍA
 - II. GEOLOGÍA
 - III. PROPIEDADES DE LAS ROCAS, RELLENOS Y FRACTURAS
 - IV. PROBLEMAS DE ESTABILIDAD DE TALUDES PRESENTES EN LA PARTE ORIENTAL DE LA SIERRA DE GUADALUPE
 - V. TRATAMIENTOS GEOTÉCNICOS PARA ESTABILIZACIÓN DE TALUDES EN LA PARTE ORIENTAL DE LA SIERRA DE GUADALUPE
 - VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

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 deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria a 5 de abril del 2004.
EL DIRECTOR

M.C. GERARDO FERRANDO BRAVO
GFB/AJP/crc.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres Ricardo y Francisca por todo su apoyo durante mi carrera.

A mi director de tesis Dr. Armando García Palomo.

A los integrantes del Servicio Geológico Metropolitano: Víctor Carlos Valerio, Celia López, Hernando Rueda, Miguel Tapia, Adriana Galván y Wendy Morales.

A mis sinodales: Lic. José René Gómez Rodríguez, M.I. Gabriel Moreno Pecero, Ing. Francisco de Jesús Chacón García, Ing. Ernesto René Mendoza Sánchez.

Al director del Instituto de Geología Dr. Gustavo Tolson Jones.

A Protección Civil del Distrito Federal en especial al Ing. Luis Wintergerst.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
I. GEOGRAFÍA.....	2
I.1 LOCALIZACIÓN Y VIAS DE COMUNICACIÓN	2
I.2 CLIMA	3
I.3 MORFOLOGÍA.....	5
I.4 TOPOGRAFÍA	6
I.5 HIDROLOGÍA	6
II. GEOLOGÍA	9
II.1 GEOLOGÍA REGIONAL.....	9
II.2 GEOLOGÍA LOCAL	9
II.2.1 ESTRATIGRAFÍA.....	10
II.2.2 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL.....	11
II.3 SISMICIDAD	12
III. PROPIEDADES DE LAS ROCAS, RELLENOS Y FRACTURAS	14
III.1 PROPIEDADES ÍNDICE	15
III.2 PROPIEDADES MECÁNICAS.....	15
IV. PROBLEMAS DE ESTABILIDAD DE TALUDES PERESENTES EN LA PARTE ORIENTAL DE LA SIERRA DE GUADALUPE.....	20
IV.1 MECANISMOS DE FALLA DE TALUDES ROCOSOS.....	20
IV.1.1 DESLIZAMIENTO.....	20
IV.1.1.1 FALLA PLANA.....	20
IV.1.1.2 FALLA EN CUÑA.....	21
IV.1.1.3 FALLA ROTACIONAL	21
IV.1.2 VOLTEO	22
IV.1.2.1 VOLTEO SINGULAR.....	22
IV.1.2.2 VOLTEO MÚLTIPLE.....	23
IV.1.3 CAÍDA.....	23
IV.1.3.1 CAÍDA PRIMARIA	23
IV.1.3.2 CAÍDA SECUNDARIA	24
IV.1.4 FLUJO	25
IV.1.4.1 FLUJO DE LODOS.....	25
IV.1.4.2 FLUJO DE ROCAS.....	25
IV.2 FACTORES QUE AFECTAN LA ESTABILIDAD DE LOS TALUDES....	26
IV.3 MECANISMOS POTENCIALES DE FALLA RECONOCIDOS	28
V. TRATAMIENTOS GEOTÉNICOS PARA ESTABILIZACIÓN DE TALUDES EN LA PARTE ORIENTAL DE LA SIERRA DE GUADALUPE.....	36

V.1 TRATAMIENTOS PARA ESTABILIDAD DE TALUDES ROCOSOS	36
V.2 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD PARA LOS MECANISMOS POTENCIALES DE FALLA PRESENTES	55
V.3 PROPUESTAS GEOTÉCNICAS DE MITIGACIÓN PARA CADA MECANISMO DE FALLA PRESENTE	72
VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	77
BIBLIOGRAFÍA	79
ANEXOS	82

INTRODUCCIÓN

El rápido crecimiento de la población en la Ciudad de México ha ocasionado que se habiten las laderas de la Sierra de Guadalupe en forma irregular. Esto puede causar problemas al asentarse la población en lugares en donde existen problemas de estabilidad de taludes que pueden causar pérdidas materiales y humanas. Por estos motivos es importante conocer las zonas en las que puede ocurrir un deslizamiento para solucionarlo. En este trabajo se presenta un panorama general de estabilidad de taludes rocosos y tratamientos de estabilización en la parte oriental de la Sierra de Guadalupe.

En este trabajo en primer lugar se describen las características del medio físico como son: localización y vías de comunicación, condiciones climáticas, morfológicas, topográficas e hidrológicas. Posteriormente se realiza una descripción de las características ante las que destaca el tipo de roca y características estructurales, así como la sismicidad.

Posteriormente se describen las propiedades geotécnicas más importantes de las rocas. Después se realiza una descripción de los mecanismos de falla y los factores que desencadenan el deslizamiento. De acuerdo al análisis realizado se ejemplifican los mecanismos de falla comunes en la región. Por último se describen algunos tratamientos para estabilización de los taludes en base al análisis de bloques que presentan un mecanismo de falla.

I.- GEOGRAFÍA

I.1 LOCALIZACIÓN Y VÍAS DE COMUNICACIÓN

LOCALIZACIÓN

El área de estudio se encuentra en la parte oriental de la Sierra de Guadalupe, localizada en la porción central de la Cuenca de México, y está delimitada por las coordenadas $19^{\circ}30'$, $19^{\circ}38'$ N y $99^{\circ}00'$, $99^{\circ}08'$ W. La parte oriental de La Sierra de Guadalupe la comparten los municipios de Tlalnepantla y Ecatepec de Morelos pertenecientes al Estado de México. (Fig. I.1).

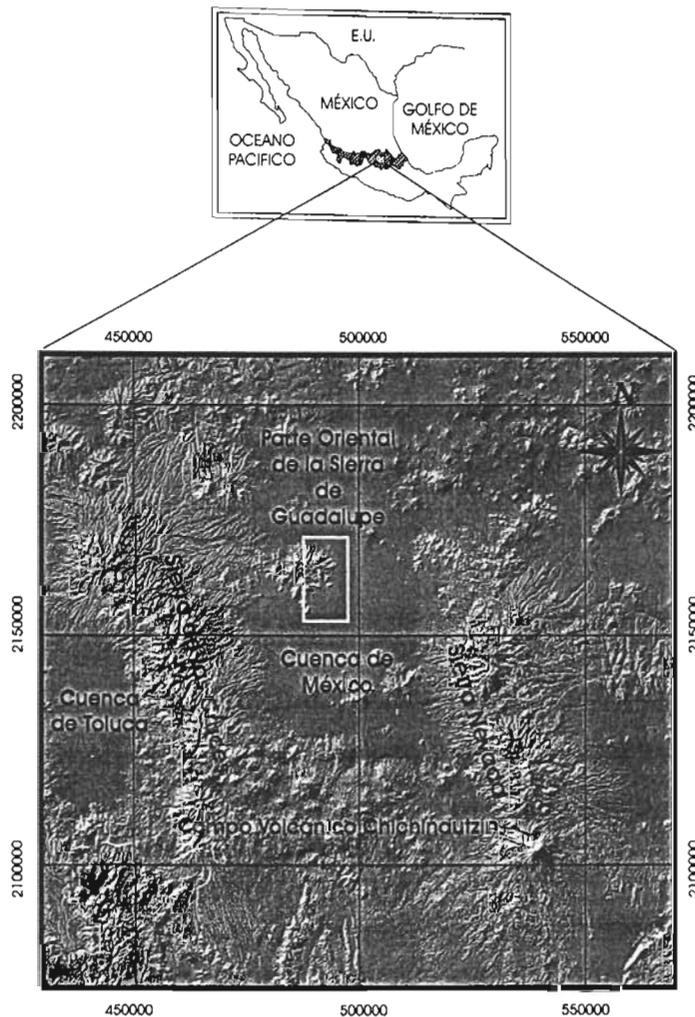


Figura I.1 Localización del área de estudio.

VÍAS DE COMUNICACIÓN

Para llegar a la parte oriental de la Sierra de Guadalupe se tienen dos accesos principales, uno es por la autopista México-Pachuca y la otra es por la Vía Morelos (Fig. 1.2).

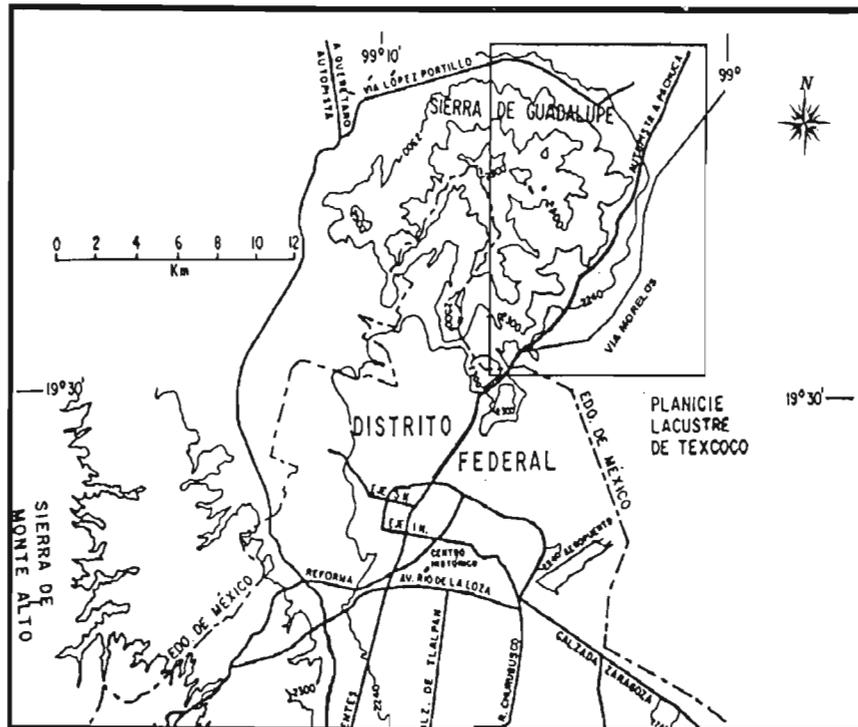


Figura 1.2 Principales vías de comunicación de la parte oriental de la Sierra de Guadalupe.

1.2 CLIMA

El clima presente en la parte oriental de la Sierra de Guadalupe se puede dividir en dos. El de la parte alta que se identifica por la fórmula $C (W_o) (w) b (i)$ que representa un clima templado sub-húmedo, de acuerdo a la clasificación de Köpen y modificado de García (1988), su humedad es intermedia entre los subhúmedos, el régimen de lluvias ocurre en verano los meses de junio a septiembre con un promedio de precipitación entre 100 mm – 180 mm mensuales y una precipitación promedio anual máxima de 710 – 820 mm. El verano es fresco y largo con una temperatura promedio de $15.6^{\circ} C$. La temperatura del mes más

frío es de 5° C, con ocasionales heladas en los meses de noviembre a febrero del año y la temperatura más caliente es de 34°C.

En la planicie que rodea la sierra existe un clima tipo semi-seco, del subtipo de los semi-secos templados cuya temperatura media anual se encuentra entre 12 y 18° C. Las lluvias ocurren en verano en los meses de Junio a Septiembre y los meses más calurosos son de marzo a junio.

En la zona oriental que abarca los Municipios de Ecatepec de Morelos y Tlalnepantla se tiene un registro anual de 720 mm, varía hacia la planicie hasta 600 mm anuales, el área de reserva ecológica, tiene los valores más altos de 750 a 820 mm anuales. Algunos datos de precipitación de la parte oriental de la Sierra de Guadalupe son las que se muestran en la Tabla I.1.

MUNICIPIO	GEOFORMA	PRECIPITACIÓN (mm)
Ecatepec de Morelos	Pico Moctezuma con una pendiente aproximada de entre 31° - 45°	720 – 740
Ecatepec de Morelos	Cerro Gordo con una pendiente aproximada de 16° - 30° en la parte alta y de 0° - 15° en la planicie.	600 - 640
Ecatepec de Morelos y Tlalnepantla	San Andrés de la Cañada con pendiente aproximada de 45° - 60° en la parte alta y de 0° - 15° en la planicie.	700 - 710
Tlalnepantla	Cerro El Chiquihuite con pendiente aproximada de 45° - 60°	600 - 640

Tabla I.1. Precipitación en los municipios de la zona oriental de la Sierra de Guadalupe.

I.3 MORFOLOGÍA

Las formas originales del relieve de la Sierra de Guadalupe fueron producidas por actividad volcánica y una fuerte afectación tectónica a través de fallas y fracturas, y modeladas posteriormente por la erosión y acumulación exógena (Fig. I.3). El relieve de la parte oriental de la Sierra de Guadalupe varía entre las cotas 2,240 a los 2,800-3,000 metros sobre el nivel del mar (msnm). La disección se manifiesta por barrancos, circos de erosión y valles, algunos de ellos en forma de herradura. La red fluvial está controlada esencialmente por el amplio fracturamiento y fallamiento que afecta a las rocas, el cual es favorecido por la ausencia de una capa superficial gruesa de material no consolidado (Lugo-Hubp, 1996).



Figura I.3 Morfología de la parte oriental de la Sierra de Guadalupe

I.4 TOPOGRAFÍA

La topografía de una región está determinada por el tipo de rocas existentes, la magnitud y edad de los procesos geomorfológicos y climáticos que actúan sobre ellas. La pendiente del terreno juega un papel importante en la estabilidad, ya que determina la magnitud de la fuerza actuante debida al peso propio del terreno.

Para el estudio se utilizó como base el mapa topográfico del Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI), en él cual se muestran los elementos naturales del área de estudio y los elementos humanos como son las carreteras, ciudades, división política entre otros. La escala utilizada es de 1:50,000 con proyección UTM, equidistancia de 10 metros entre curvas de nivel. La parte oriental de la Sierra de Guadalupe se ubica en la hoja Cuautitlán (E14A29). De acuerdo a su posición, distribución geográfica y rasgos del relieve se puede calcular una extensión aproximada de 196 Km². De acuerdo al análisis de las curvas de nivel del mapa topográfico y visto en planta se puede observar una geoforma casi semicircular, con una diferencia de desnivel de más de 800 metros, entre la cota de 2,200 msnm hasta la cota 3,010 msnm. Las principales prominencias topográficas en la parte oriental son: Cerro Gordo y Cerro El Chiquihuite, entre otros. Estas prominencias topográficas se encuentran afectadas por circos de erosión, las cuales son estructuras en forma cóncava a manera de anfiteatro con laderas empinadas, originadas en la cabecera de algunas corrientes fluviales, por deslizamiento y la acción erosiva fluvial de pequeñas escorrentías que inciden en un canal principal (Lugo-Hubp, 1996) o bien pueden ser originadas por colapsos volcánicos o influenciados por tectonismo.

I.5 HIDROLOGÍA

La zona de estudio se ubica en la región hidrológica número 26 o del "Alto Pánuco". Ecatepec corresponde a la sub-cuenca "D" o del río Moctezuma y la subcuenca "P" que corresponde a la de los lagos de Texcoco y Xaltocan.

Ecatepec cuenta con el río Los Remedios que sirve como límite territorial en la parte sur con el Distrito Federal, a la altura de la avenida Gran Canal, el cual continúa hacia el norte y el río de los Remedios hacia el oriente. Por su parte, Tlalnepantla cuenta con tres principales corrientes que son los ríos Tlalnepantla, San Javier y Los Remedios.

El patrón de drenaje de la parte oriental de la Sierra de Guadalupe, (Fig. 1.4) es variado ya que está controlado principalmente por tres factores: la morfología semicircular de la sierra, por zonas de deslizamiento y control estructural. El principal patrón de drenaje es de tipo radial, se forma en la parte central de la sierra y se distribuye alrededor de la misma. El segundo patrón de drenaje es de tipo dendrítico con textura gruesa, lo que indica con toda probabilidad una alta permeabilidad de los materiales. Este patrón de drenaje está controlado por zonas denominadas circos de erosión. Por último, se presenta el patrón de drenaje angular, caracterizado por afluentes largos que siguen zonas de largas fracturas o fallas e interceptados por tributarios más pequeños a ángulos rectos, lo que corresponde a estructuras secundarias menores.

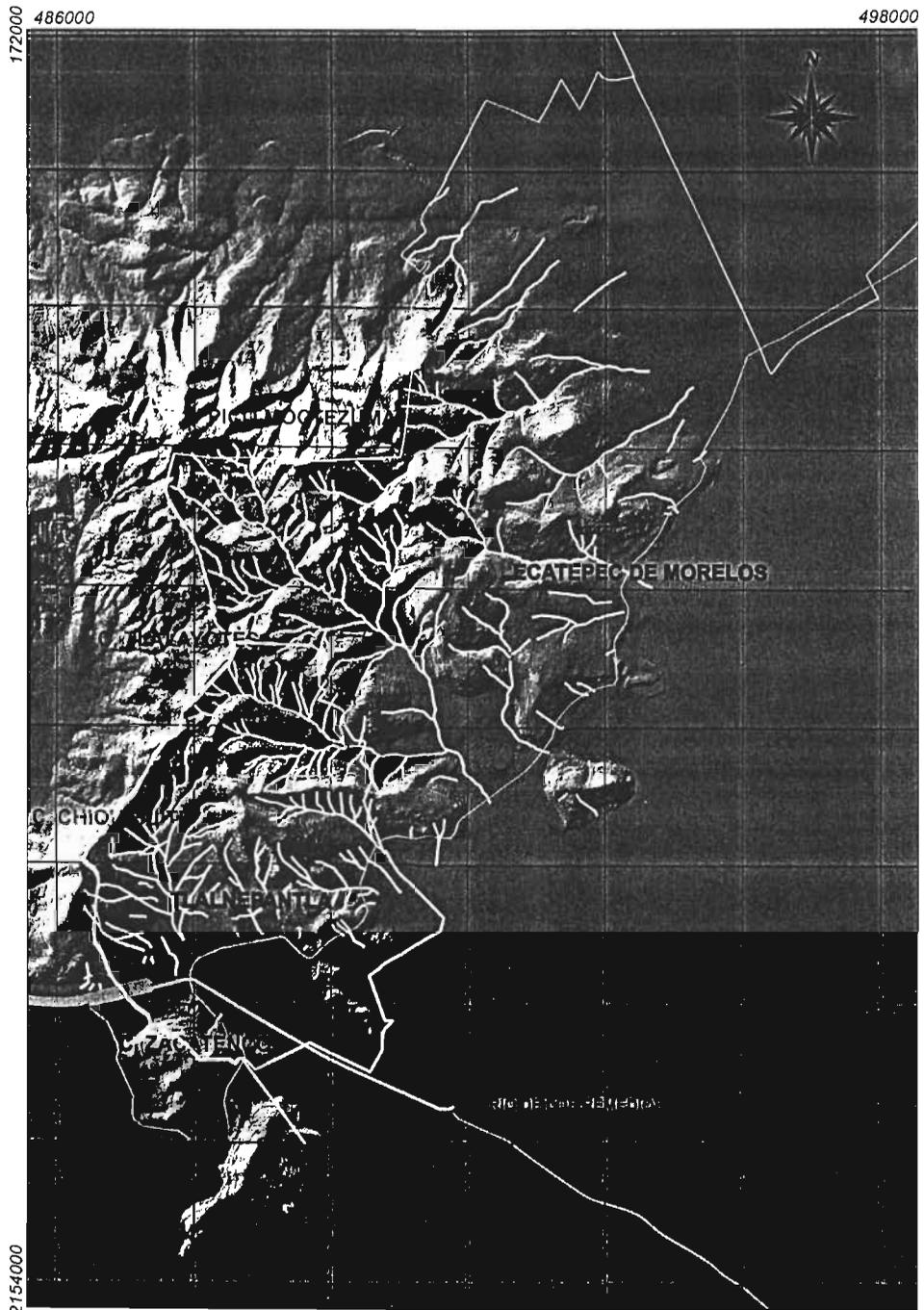


Figura I.4 Patrón de drenaje del área de estudio.

II.- GEOLOGÍA

II.1 GEOLOGÍA REGIONAL

La zona de estudio se localiza regionalmente dentro del Cinturón Volcánico Trans-Mexicano (CVTM). El CVTM es un arco volcánico continental con una composición predominantemente andesítico-dacítico, que se extiende por más de 1,200 Km desde las costas del Pacífico hasta las inmediaciones del Golfo de México con un ancho que varía entre 20 y 200 Km y está distribuido de manera oblicua con respecto a la Trinchera Mesoamericana (Molnar, 1969). El origen del CVTM ha sido asociado al proceso de subducción de la Placa de Cocos y Rivera por debajo de la Placa de Norteamérica (Pardo y Suárez, 1993; Ponce, 1992). Otros autores han sugerido que el CVTM está relacionado a zonas de fracturas o megacizallas (Cebull y Shurbet, 1987). Esta provincia volcánica está formada de cuencas de origen vulcano-tectónico entre las que se puede señalar a la Cuenca de México.

II.2 GEOLOGÍA LOCAL

La parte oriental de la Sierra de Guadalupe está constituida por 5 unidades volcánicas constituidos por domos y volcanes de diferente tamaño. Los domos son: El Tejocote, Cerro Gordo y Chiquihuite, entre los estratovolcanes se encuentran: Moctezuma y La Presa (Servicio Geológico Metropolitano, 2003). Estos presentan características volcánicas particulares que permiten diferenciarlos entre sí. La composición de las rocas que constituyen a la parte oriental de la Sierra de Guadalupe son predominantemente de composición ácida, como dacitas y en menor proporción rocas intermedias como andesitas. Respecto a la edad, se han efectuado diversos fechamientos radiométricos entre 14 y 16 Millones de años (Ma.) (Lozano, 1968; Jacobo, 1985) lo cual permite ubicarla dentro del Mioceno medio, constituyéndola como la sierra más antigua dentro de la Cuenca de México junto con la Sierra de Tepozotlán.

II.2.1 ESTRATIGRAFÍA

Las principales estructuras volcánicas que constituyen a la parte oriental de la Sierra de Guadalupe son las siguientes, en orden estratigráfico:

Volcán Moctezuma

Es un volcán constituido por rocas dacíticas de color gris oscuro, con cristales de plagioclasa, piroxenos y algunos anfíboles. Su altura es de 2,960 msnm y con pendientes de 31° a 45°.

Domo El Tejocote

Constituido por rocas de composición dacítica de color rosa, con cristales de cuarzo y plagioclasa. Tiene una altura máxima de 2,850 msnm y con pendientes hasta de 45°.

Volcán La Presa

Es una estructura formada por roca de composición dacítica de color gris oscuro. Este volcán tiene una altura máxima de 2,660 msnm con pendientes hasta de 60°.

Domo Cerro Gordo

Este domo está constituido por roca dacítica de color rosa claro, con cristales de plagioclasa, anfíboles y abundante cuarzo, tiene una altura máxima de 2,440 msnm, y pendientes en su mayoría de 45°.

Domo El Chiquihuite

Está formado por roca dacítica de color rosa, con cristales de cuarzo y plagioclasa. Domo que tiene una altura máxima de 2,650 msnm y pendientes desde 30° hasta 60°.

II.2.2 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

En la parte oriental de la Sierra de Guadalupe existen dos sistemas de fallas. El primero con una orientación WNW-ESE, asociado con la actividad de la Faja Volcánica Mexicana y posiblemente sea el que originó la Sierra de Guadalupe, el segundo es posterior a la formación de la Sierra de Guadalupe y el mejor definido, con una orientación NE 30°- 45°, al que pertenecen las fallas Tenayuca y Chiquihuite (Lozano, 1968).

Estos sistemas de fallas y fracturas presentan indicios de actividad a través del tiempo y los sitios en donde se interceptan conforman las zonas de mayor inestabilidad en las laderas de la parte oriental de la Sierra de Guadalupe. Las fallas más importantes que afectan a la parte oriental son las fallas con una orientación NE-SW, entre las que se encuentran:

Falla Chiquihuite

Esta falla fue descrita inicialmente por Mooser (1992) se localiza desde El Cerro El Chiquihuite, lugar de donde toma su nombre, hasta las inmediaciones del Municipio de Coacalco y Ecatepec, tramo que alcanza una longitud cerca de los 6 km. Es paralela a la Falla Tenayuca, y ambas tienen una orientación de N35°E con un buzamiento de 70° al NW, formando la fosa de Cuatepec. Ésta es una falla normal y se caracteriza por ser continua y se reconoce por el alineamiento de un conjunto de domos, estrias, escarpes, zonas de alto facturamiento y trituración.

Falla Tlalayotes

La falla Tlalayotes (Servicio Geológico Metropolitano, 2003) es una estructura secundaria que une a las fallas Tenayuca y Chiquihuite, con un ángulo de 50° aproximadamente y una longitud de 3.5 Km. Se trata de una falla normal con una orientación de N22°W, con un fuerte buzamiento hacia el SW. Es una falla con un escarpe continuo pronunciado, con arroyos paralelos que indican la presencia de más fracturas con esta orientación.

II.3 SISMICIDAD

Los sismos que se presentan en la Cuenca de México se originan principalmente en dos regiones; el primero en las costas del Pacífico y se deben a la subducción de la Placa de Cocos bajo la de Norteamérica, y el segundo son los sismos intraplaca que se forman dentro del continente y son generados por fallas activas.

La sismicidad es un factor importante al momento de evaluar la estabilidad de un macizo rocoso, debido a que su influencia se manifiesta como una fuerza que casi siempre se considera horizontal, actúa por períodos cortos y cambia de signo o sentido con una frecuencia que corresponde a la del sismo.

La fuerza por sismo queda definida como:

$$F_s = cW$$

Donde W representa el peso del macizo sobre el cual se considera aplicado el empuje sísmico y la constante "c" corresponde a la proporción de la aceleración inducida por el sismo respecto a la de la gravedad (g) (Fig. II.1).

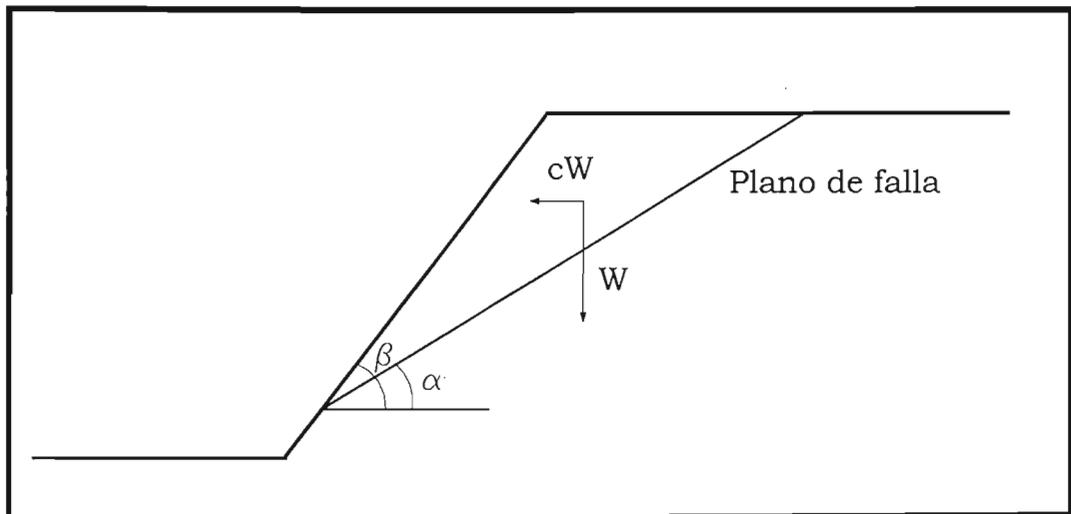


Figura II.1 Talud con las componentes del peso y empuje sísmico.

El coeficiente c se obtiene de las cartas de regionalización sísmica de la Comisión Federal de Electricidad (C.F.E.) donde se presentan los valores de la

aceleración horizontal máxima que puede ocurrir en un sitio y con un periodo de retorno dados (C.F.E.,1993), (Fig. II.2).

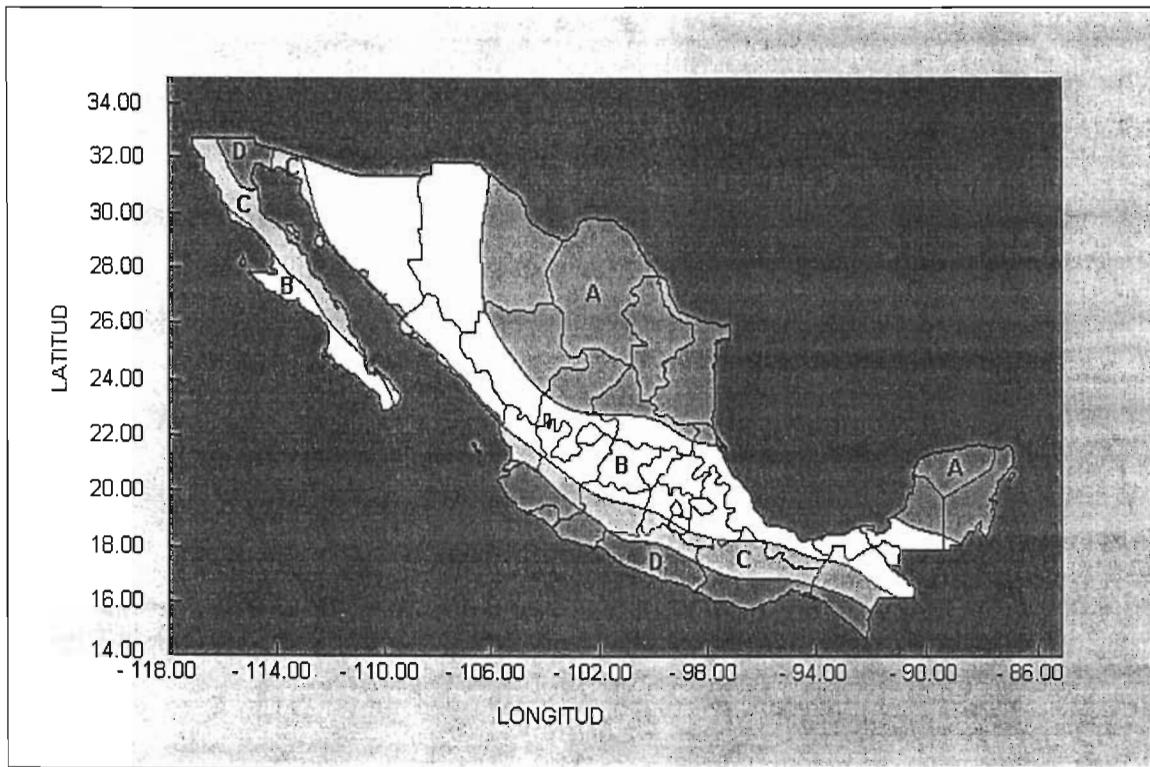


Figura II.2 Carta de regionalización sísmica de la Republica Mexicana.

De acuerdo con la zonificación sísmica (C.F.E.,1993) la zona de estudio se encuentra en la zona B, que aproximadamente abarca toda la Cuenca.

Zona	Suelo	c	Descripción
B	I	0.16	Terreno firme, tepetate, arenisca compacta
	II	0.20	Arenas no cementadas, arcillas de mediana rigidez
	III	0.24	Arcillas blandas muy compresibles

En la tabla, "c" representa el coeficiente sísmico básico, y en este caso se usará el valor de 0.16 asignado al tipo de suelo I, en vista de que se trata de terreno firme.

III.- PROPIEDADES DE LAS ROCAS, RELLENOS Y FRACTURAS

El comportamiento de las rocas bajo la acción de cargas estáticas y dinámicas, empujes hidrostáticos, dilatación por temperatura, y esfuerzos tectónicos, depende de sus propiedades físicas y mecánicas. Estas propiedades influyen determinantemente en la estabilidad de un talud rocoso.

En el talud es importante distinguir entre propiedades macroscópicas y microscópicas de las rocas. Las macroscópicas se refieren a la roca en conjunto y las microscópicas se refieren a los constituyentes minerales que forman la roca. Además de estas propiedades también será útil aclarar la diferencia entre la roca intacta y el macizo rocoso.

Roca intacta: se refiere a la mezcla consolidada y cementada de partículas minerales que forman los bloques dentro de las discontinuidades del macizo rocoso. En la mayoría de rocas ígneas y metamórficas la resistencia de la roca intacta es uno o dos órdenes de magnitud más grande que la del macizo y la falla de este material generalmente no está involucrada. (Hoek y Bray, 1996).

Macizo rocoso: es la roca tal como se encuentra en el sitio y en un estado discontinuo debido a la presencia de sistemas estructurales como fracturas, fallas o planos de estratificación. La falla del talud generalmente está asociada con movimientos a través de las superficies de estas discontinuidades (Hoek y Bray, 1996).

Es importante conocer algunas de las propiedades más importantes de las rocas, de las cuales depende en gran medida su comportamiento, debido a cargas externas o bien para obtener en términos cualitativos y cuantitativos que den un parámetro de la estabilidad del talud.

III.1 PROPIEDADES ÍNDICE

Las propiedades índice o físicas se refieren a aquellas características de la roca que permiten clasificar y obtener una idea cualitativa de su comportamiento bajo ciertas circunstancias (Hoek y Bray, 1996).

Algunas de las propiedades índice más importantes son:

- a) Mineralogía: se refiere al contenido mineralógico de la roca y el cual influye notablemente en su comportamiento.
- b) Peso volumétrico: es la relación entre el peso y el volumen de la muestra.

$$\gamma = W_m / V_m$$

donde: γ : Peso volumétrico
Wm: Peso de la muestra
Vm: Volumen de la muestra

III.2 PROPIEDADES MECANICAS

Las propiedades mecánicas de la roca influyen de manera determinante en la estabilidad de taludes rocosos. Si en un talud existe una superficie potencial de falla, el deslizamiento ocurrirá cuando las fuerzas que contribuyen al deslizamiento sean mayores que las fuerzas que se oponen al deslizamiento. Entre las fuerzas que se oponen al deslizamiento la más importante es la resistencia al corte en la fractura.

Las propiedades mecánicas más importantes son:

- a) Dureza: es una propiedad mecánica que afecta la resistencia de las rocas. La dureza es utilizada como criterio de resistencia. Generalmente la resistencia de las rocas crece a medida que aumenta su contenido de cuarzo.
- b) Resistencia a la compresión simple: se refiere a la capacidad de la roca para soportar la acción de fuerzas externas. La resistencia de una roca generalmente está controlada por los siguientes factores: composición,

mineralógica, dureza de los minerales, durabilidad de la roca, resistencia del cementante granular, orientación de granos y cristales respecto a las cargas y deformaciones, discontinuidades de la roca como juntas, fracturas, poros, elasticidad y plasticidad de la roca etc.

- c) Resistencia la esfuerzo cortante (τ): de especímenes de roca que tienen una discontinuidad geológica, como una junta o una fractura, que han sido sujetos a un sistema de carga hasta provocar la falla a través de la discontinuidad, se ha observado que el esfuerzo cortante requerido para causar el deslizamiento es mayor a medida que el esfuerzo normal (σ) incrementa.
- d) Cohesión (c): es la fuerza de unión entre las partículas minerales que forman la roca. Además de ser una componente de la resistencia al esfuerzo cortante. Este valor inicial de esfuerzo cortante define la resistencia cohesiva (c) de la discontinuidad.
- e) Angulo de fricción (ϕ): es el ángulo de rozamiento entre dos planos de la misma roca: para la mayoría de las rocas este ángulo varía entre 25 y 45.

Resistencia al esfuerzo cortante en discontinuidades

En general las masas rocosas son atravesadas por rasgos estructurales que controlan su comportamiento mecánico, especialmente cuando están cerca de la superficie y los esfuerzos son bajos. En el análisis de estabilidad de taludes hay que considerar la geometría del macizo rocoso delimitada por las discontinuidades y la inclinación de las discontinuidades pues esto nos indica el tipo de bloques y la dirección en que pueden deslizarse, rodar o volcar. Otro factor importante es la resistencia al corte de la superficie potencial de falla la cual puede consistir en una superficie plana, circular o compleja dependiendo de si involucra una sola discontinuidad o varias, pudiéndose presentar el fracturamiento de bloques intactos (Fig. III.1).

La ecuación básica para determinar la resistencia al esfuerzo cortante en las discontinuidades puede ser representada por la ecuación de Mohr-Coulomb, (Hoek y Bray, 1996):

$$\tau_p = c + \sigma_n \tan\phi$$

donde: c es la resistencia cohesiva de la superficie cementada

ϕ es el ángulo de fricción

τ_p es el máximo valor de resistencia al corte

σ_n es el esfuerzo normal

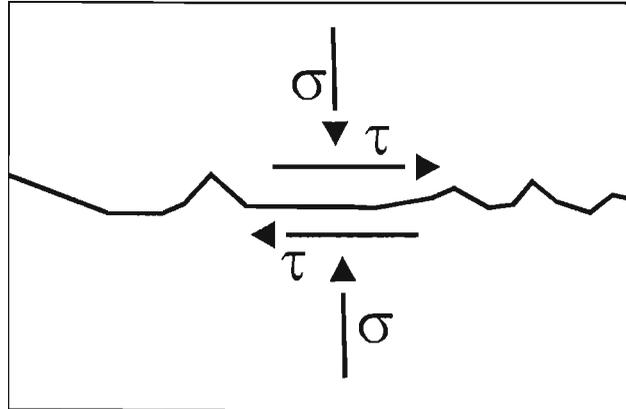


Figura III.1 Fuerzas que actúan en la grieta

La resistencia de corte máxima corresponde a la suma de la resistencia del material cementante más la resistencia friccionante de las superficies probadas. Si el esfuerzo cortante aumenta se empezarán a presentar desplazamientos más fuertes en la roca llegando al punto en que la resistencia cae a un valor residual y se mantiene constante, incluso para largos desplazamientos de corte.

En el caso de la resistencia residual la cohesión ha sido vencida y vale 0. La ecuación se convierte en:

$$\tau_r = \sigma_n \tan\phi_r$$

donde: τ_r es la resistencia al esfuerzo cortante residual

ϕ_r es el ángulo de fricción residual

Patton (1966) demostró, mediante experimentos y ensayos en roca con superficies dentadas, la influencia que tienen las asperezas y ondulaciones en el comportamiento de juntas y discontinuidades, principalmente en su resistencia al esfuerzo cortante. El desplazamiento al corte en estos especímenes de roca

dentados ocurre como resultado del movimiento de las superficies inclinadas, lo que causa un desplazamiento perpendicular a la dirección de corte, presentándose un cambio de volumen del espécimen. Este fenómeno se conoce como dilatancia.

La ecuación de Patton de resistencia al corte para especímenes dentados puede ser representada como (Fig. III.2):

$$\tau = \sigma_n \tan (\phi_b + i)$$

donde: ϕ_b es el ángulo base de fricción, es aproximadamente igual al ángulo residual pero generalmente se mide en pruebas de corte en especímenes dentados de roca o en muestras que contienen una discontinuidad

i es el ángulo promedio de la superficie dentada o de las ondulaciones

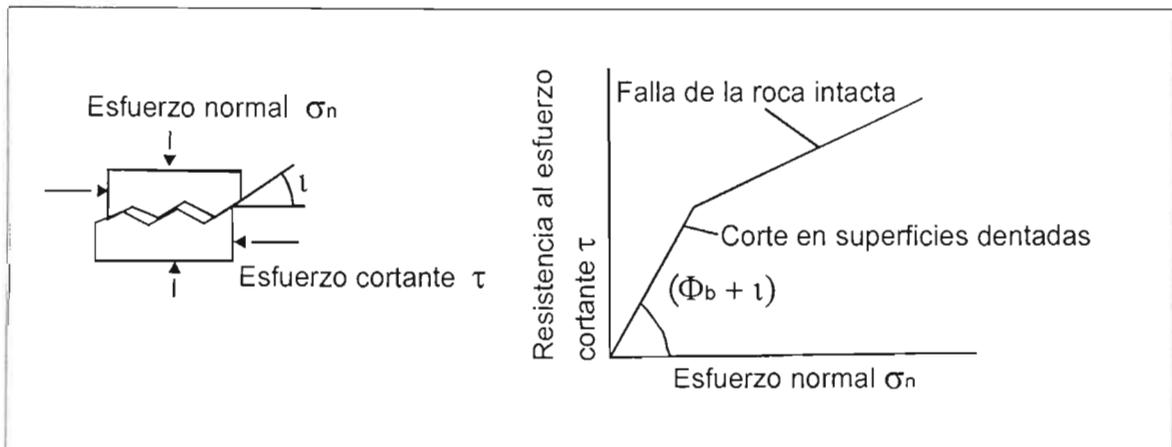


Figura III.2. Influencia de la rugosidad en el cálculo del esfuerzo cortante.

La ecuación de Patton sirve para esfuerzos bajos, pero para esfuerzos altos la resistencia del material intacto se puede exceder y las asperezas se rompen teniendo como resultado que el comportamiento de la resistencia está más ligado a la resistencia del material intacto que a las características friccionantes de las superficies

Resistencia la corte de discontinuidades con relleno

En ocasiones, la junta presenta un relleno de material aluvial, de modo que en algunos casos durante los desplazamientos tangenciales no entran en contacto las superficies de la roca. Cuando el relleno es débil, de espesor considerable y la tensión normal no es elevada, las irregularidades de las juntas no suelen romperse durante el desplazamiento. En caso contrario si el relleno es friccionante de poco espesor y las tensiones normales son elevadas, suele producirse rotura de irregularidades (Normas RENFE, 1999).

Cuando no hay rotura de rugosidades, la resistencia la corte presenta la siguiente expresión:

$$\tau = \frac{C_u}{1 - \tan i \tan \phi_u} + \sigma \tan(\phi_u + i)$$

donde: C_u representan la cohesión

ϕ_u ángulo de fricción interno sin drenaje de la arcilla.

i varía entre i_0 y 0 en función del espesor relativo del relleno.

IV.- PROBLEMAS DE ESTABILIDAD DE TALUDES PRESENTES EN LA PARTE ORIENTAL DE LA SIERRA DE GUADALUPE.

IV.1 MECANISMOS DE FALLA DE TALUDES ROCOSOS

Los factores que favorecen el deslizamiento de laderas tienen una estrecha relación con las características geológicas del terreno, estos factores son: el tipo de roca, grado de alteración, discontinuidades como fallas y fracturas, permeabilidad, porosidad y saturación. A continuación se describen los principales mecanismos de falla:

IV.1.1 DESLIZAMIENTO

Son movimientos relativamente rápidos del talud en los cuales la masa de suelo o roca se mueve a través de una o más superficies bien definidas y que definen la geometría del deslizamiento. Ocurre cuando una masa rocosa es atravesada por una discontinuidad que aflora y delimita un bloque, el cual puede deslizarse si las fuerzas a favor del movimiento son mayores que las fuerzas que se oponen al movimiento. El deslizamiento se subdivide en los siguientes:

IV.1.1.1 FALLA PLANA

Son movimientos traslacionales de masas monolíticas de roca presentes en superficies planas formadas por discontinuidades como son: planos de estratificación, foliación, clivaje y fracturas, que tal vez pueden estar rellenas de materiales arcillosos (Fig. IV.1.1)

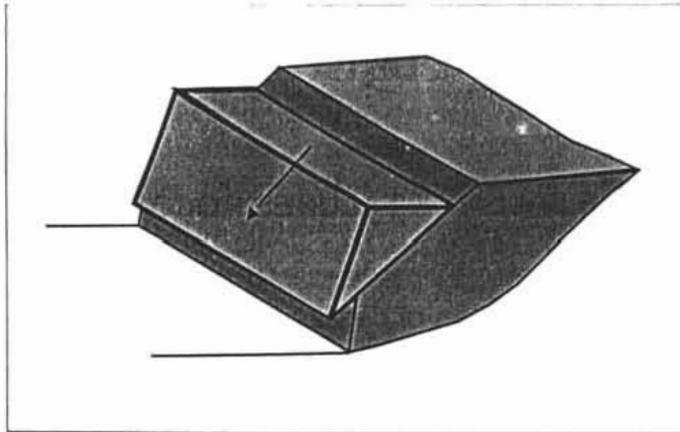


Figura IV.1.1 Falla plana (Hoek y Bray, 1996).

IV.1.1.2 FALLA EN CUÑA

Se refiere a la falla en masas rocosas en las cuales el deslizamiento se desarrolla sobre la línea de intersección de dos discontinuidades planas (Fig. IV.1.2.)

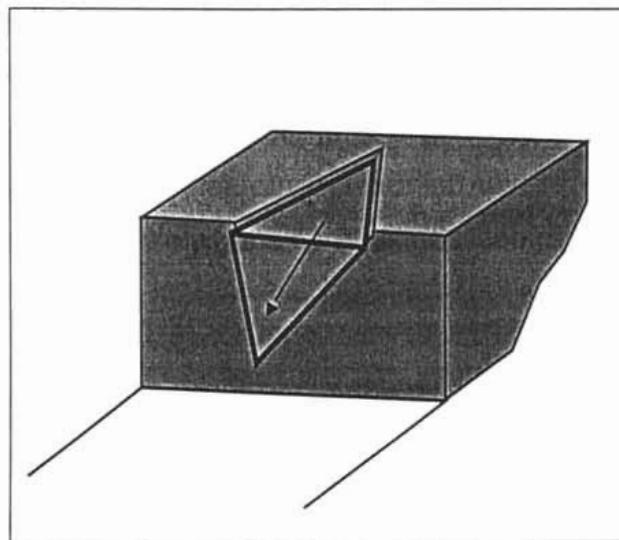


Figura IV.1.2 Falla en cuña (Hoek y Bray, 1996).

IV.1.1.3 FALLA ROTACIONAL

La falla se presenta por corte a través de una superficie curva (circular o lústica) y el movimiento es a moderada velocidad. Se puede encontrar en rocas muy fracturadas o alteradas y en suelos cohesivos (limos y arcillas) y granulares (arenas y gravas) (Fig. IV.1.3.).

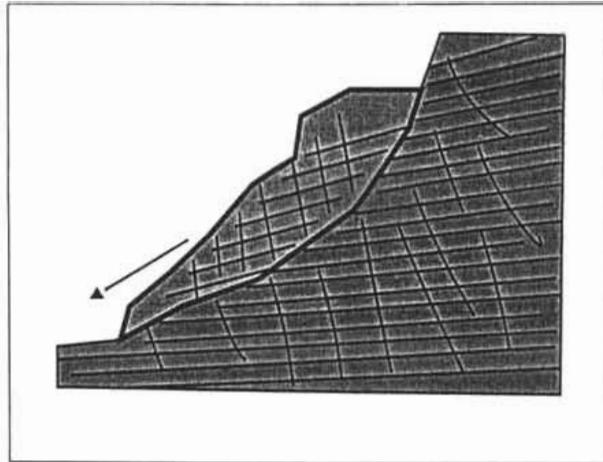


Figura IV.1.3 Falla rotacional (Hutchinson, 1996)

IV.1.2 VOLTEO

Este tipo de falla ocurre cuando la resultante de las fuerzas aplicadas a un bloque pasa o cae fuera de un punto pivote en la base del mismo y alrededor del cual se produce un giro o volteo. Es común encontrarlo en masas rocosas con discontinuidades casi verticales.

IV.1.2.1 VOLTEO SINGULAR

Este mecanismo de falla se presenta en estructuras columnares separadas por discontinuidades con echados casi verticales, generalmente son bloques individuales separados del macizo rocoso (Fig. IV.1.4.)

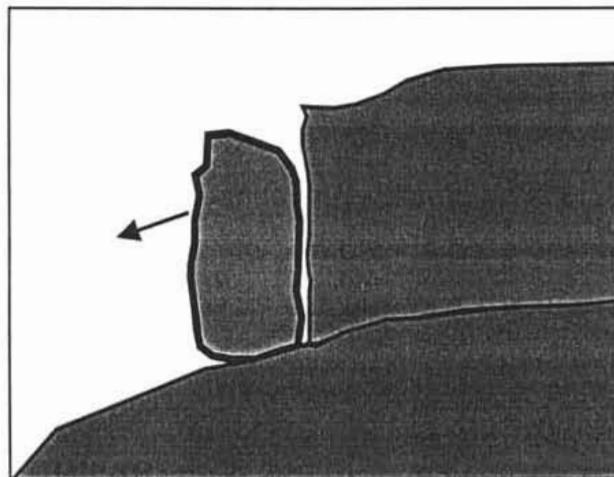


Figura IV.1.4 Volteo singular (Hutchinson, 1996)

IV.1.2.2 VOLTEO MÚLTIPLE

El volteo múltiple involucra varios bloques que interactúan entre sí, lo cual provoca que se derriben recíprocamente uno con otro. Estos están predominantemente sobre discontinuidades preexistentes (Fig. IV.1.5.)

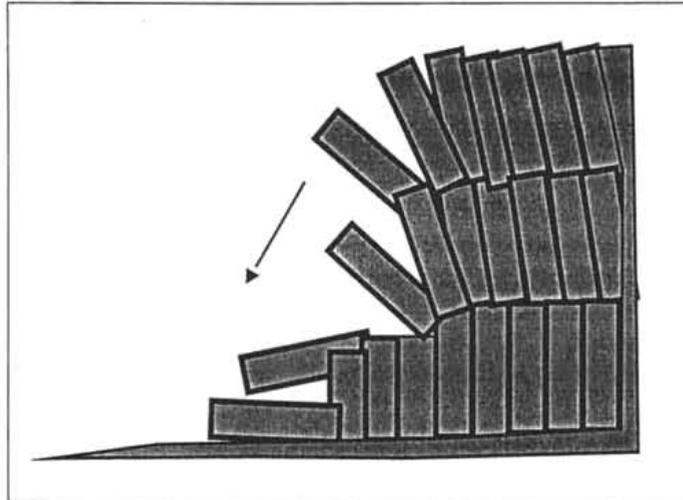


Figura IV.1.5 Volteo múltiple (Hutchinson, 1996)

IV.1.3 CAÍDA

Es un mecanismo de falla que comprende un descenso rápido y libre de masas de roca o suelo con tamaño variable, sobre taludes con fuerte pendiente o en acantilados. El movimiento puede incluir deslizamiento, rodamiento, rebotes y caída libre. La caída se divide en las siguientes:

IV.1.3.1 CAÍDA PRIMARIA

Esta caída implica la separación de roca y suelo de su posición original. En este tipo de proceso la separación del material es generalmente progresiva (Fig. IV.1.6.)

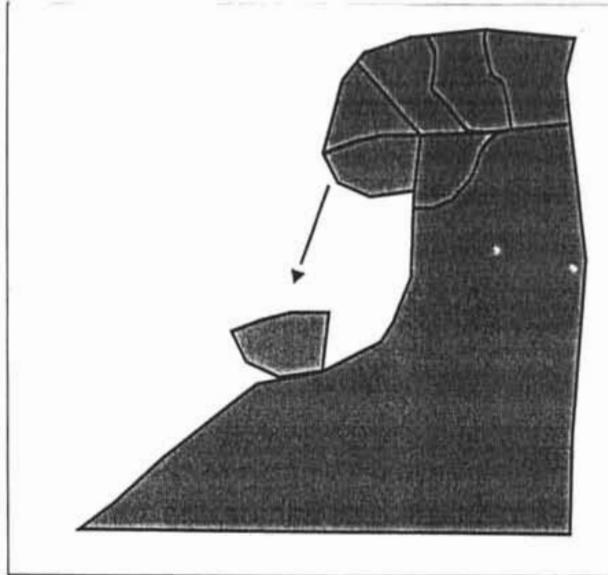


Figura IV.1.6 Caída primaria (Hutchinson, 1996)

IV.1.3.2 CAÍDA SECUNDARIA

Involucra material disgregado, que ha quedado como un residuo del primario. Los fragmentos del material suelto pueden sufrir rodamiento de roca (Fig. IV.1.7.)

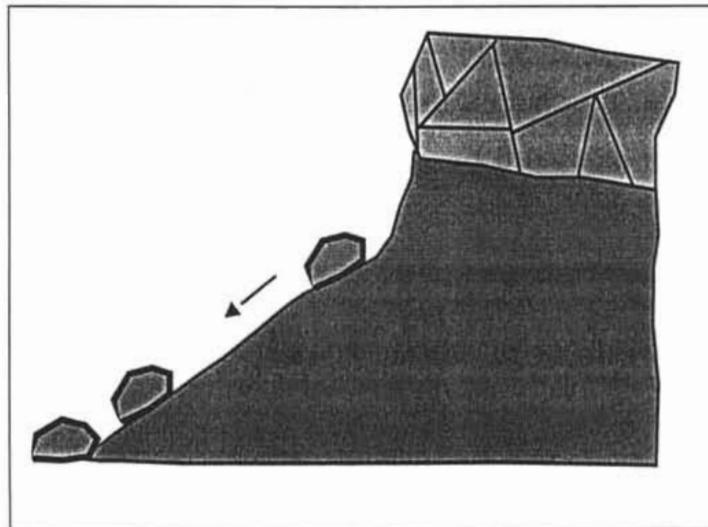


Figura IV.1.7 Caída secundaria (Hutchinson, 1996)

IV.1.4 FLUJO

Son caracterizados por un colapso repentino y rápido de una masa granular y detrítica. El material involucrado generalmente es altamente poroso o muy alterado. Como resultado de la perturbación del movimiento la sobrecarga es transmitida total o parcialmente al fluido por lo que se genera un exceso de presión de poro y la resistencia del material disminuye, comportándose como un semifluido.

IV.1.4.1 FLUJO DE LODOS

Son movimientos relativamente lentos, de forma lobular o elongada; se presentan en material detrítico inmerso en una matriz arcillosa y el movimiento se desarrolla por deslizamiento en superficies discretas.

IV.1.4.2 FLUJO DE ROCAS

Son movimientos rápidos a muy rápidos de detritos húmedos o con alto grado de saturación; generalmente se presenta un exceso de presión de poro. Esta forma destructiva de falla del talud está asociada a zonas montañosas donde una precipitación o un deshielo intenso puede movilizar los detritos del manto e incorporarlos en un flujo de detritos. El material involucrado puede ser detritos de roca alterada o estar asociado a erupciones volcánicas, lo que se conoce con el nombre de lahares (Fig.IV.1.8.)

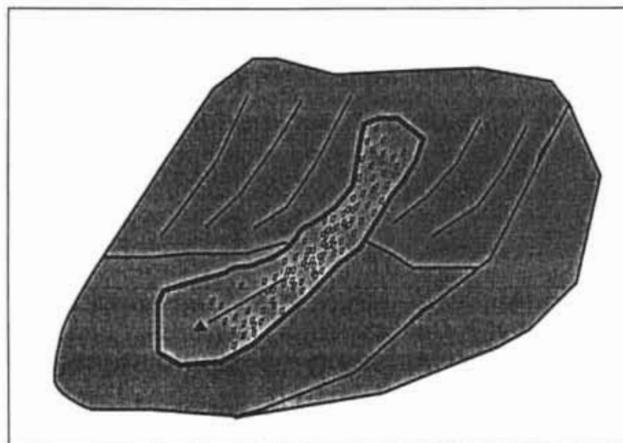


Figura IV.1.8 Flujo de rocas (Hutchinson, 1996)

IV.2 FACTORES QUE AFECTAN LA ESTABILIDAD DE LOS TALUDES

Los factores que afectan la estabilidad de taludes se pueden agrupar en cuatro categorías:

- a) Características y condiciones geológicas
- b) Procesos de tipo geomorfológico
- c) Procesos de origen físico y químico
- d) Procesos de origen humano

Por lo general las causas que producen un deslizamiento son el producto de la combinación de varios de estos factores (Herrera, 2002).

Características y condiciones geológicas del terreno

Se refiere a las condiciones del macizo de roca o suelo sobre las cuales pueden actuar los procesos para preparar o iniciar un deslizamiento (Brunsden, 1979). Las condiciones geológicas involucran tres aspectos básicos: 1) la composición química y mineralógica y el origen de los suelos y rocas, 2) la estructura y 3) las condiciones del agua en el subsuelo.

En términos generales se presenta una lista de condiciones o características del terreno que favorecen o causan el deslizamiento:

Material sensitivo

Material colapsable

Material alterado

Material cizallado

Material fracturado

Discontinuidades orientadas desfavorablemente

Contrastes de permeabilidad y sus efectos del agua subterránea

Contrastes de rigidez de materiales

Procesos de tipo geomorfológico

Son los procesos que actúan en el modelado de la corteza terrestre y que a través del tiempo producen en el estado de equilibrio de las laderas.

Procesos endógenos

- Fenómenos tectónicos

- Fenómenos volcánicos

Procesos exógenos

- Erosión fluvial

- Erosión subterránea

- Remoción de la vegetación por erosión, incendio o sequía

- Deposito de materiales en forma natural sobre la cresta de taludes

Procesos de origen físico y químico

Son procesos que inducen condiciones desfavorables en equilibrio mediante el incremento de los esfuerzos actuantes en el terreno o reduciendo algunas veces los esfuerzos resistentes del mismo. El clima y la sismicidad son los principales procesos.

- Meteorización de las rocas

- Lluvia intensa en períodos cortos de tiempo

- Precipitación prolongada

- Deshielo rápido

- Descenso o llenado rápido de embalses naturales

- Sismos

Procesos de origen humano

Son aquellas actividades que realiza el ser humano y que afecta las condiciones naturales de la estabilidad de una ladera.

- Excavación en laderas para obras civiles, (camino, canales y plataformas)

- Aplicación de carga en el talud o su cresta

- Fugas de agua en tanques y líneas de conducción

- Mantenimiento deficiente de redes de drenaje

Deforestación

Vibraciones artificiales

Creación de tiraderos con materiales muy sueltos

Excavaciones para minas externas

IV.3 MECANISMOS POTENCIALES DE FALLA RECONOCIDOS

Los mecanismos de falla reconocidos en la parte oriental de la Sierra de Guadalupe son los siguientes:

- a) Caída de rocas
- b) Deslizamiento de bloques
- c) Volteo de rocas
- d) Flujos

Estos mecanismos se identificaron mediante un trabajo de campo con un previo análisis de interpretación de fotografías aéreas. Casos particulares de los principales mecanismos de falla que se encontraron son los siguientes:

La caída por rodamiento es común encontrarla en bloques redondeados o subredondeados, que están separados de la masa estable (Fig.IV.3.1)



Fig. IV.3.1 Se muestra un bloque que puede rodar en la dirección que indica la flecha si es afectado el apoyo en su base.

La caída por desprendimiento se observa en taludes que fueron explotados, los cuales presentan fracturas y planos de estratificación casi horizontales (Fig. IV.3.2).



Fig. IV.3.2 En la fotografía se indican los bloques que pueden presentar caída por desprendimiento y afectar las viviendas.

La falla por deslizamiento plano se presenta cuando el echado de las fracturas o planos de estratificación buza a favor del deslizamiento (Fig. IV.3.3)



Fig. IV.3.3 Bloque que presenta mecanismo de falla por deslizamiento en donde las fuerzas involucradas son: σ_a es el esfuerzo actuante, σ_r es el esfuerzo resistente y P.F. es el plano de falla.

El deslizamiento en cuña aislada se presenta por la intercepción de dos sistemas de fracturas (Fig. IV.3.4).

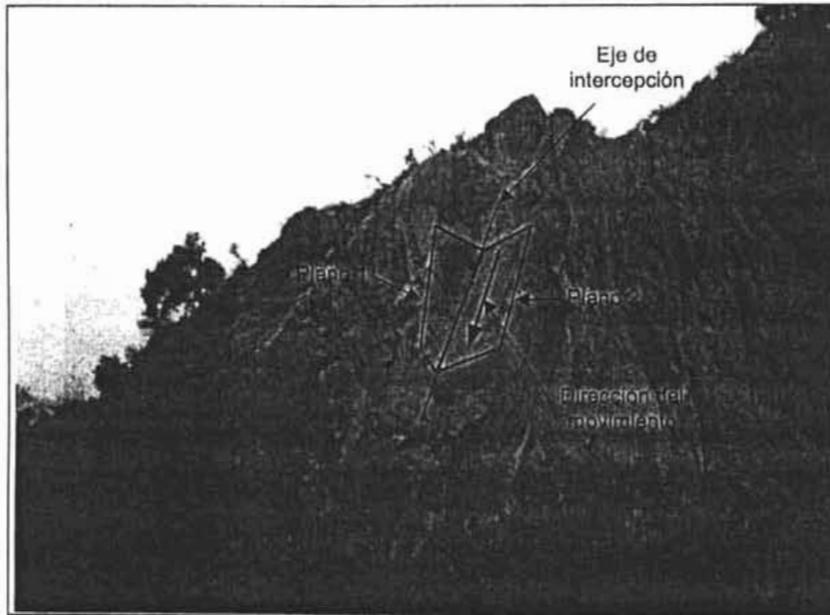


Fig. IV.3.4 En la fotografía se pueden observar la falla en cuña

La falla por volteo de bloques tabulares o columnares, esta limitada por discontinuidades con un ángulo de echado casi vertical. El volteo es hacia el frente del talud (Fig. IV.3.5, IV.3.6)



Fig. IV.3.5 Bloques columnares separados del macizo rocoso por fracturas verticales que pueden fallar por volteo en la dirección que indican las flechas y dañar a las viviendas localizadas pendiente abajo.

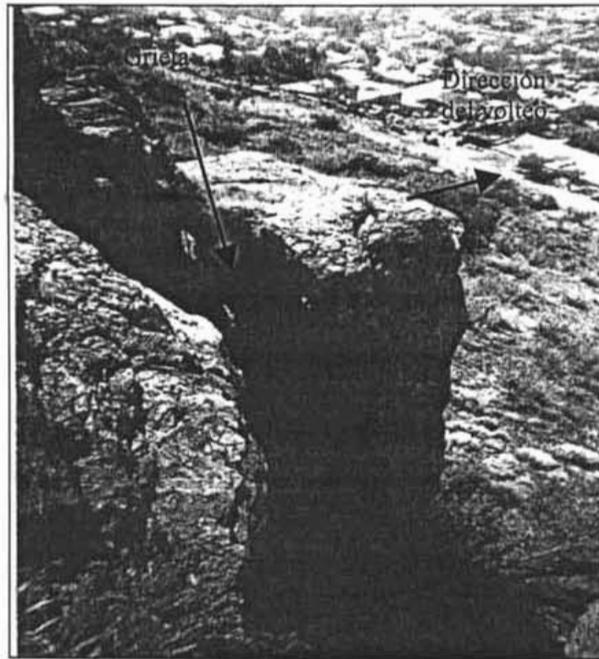
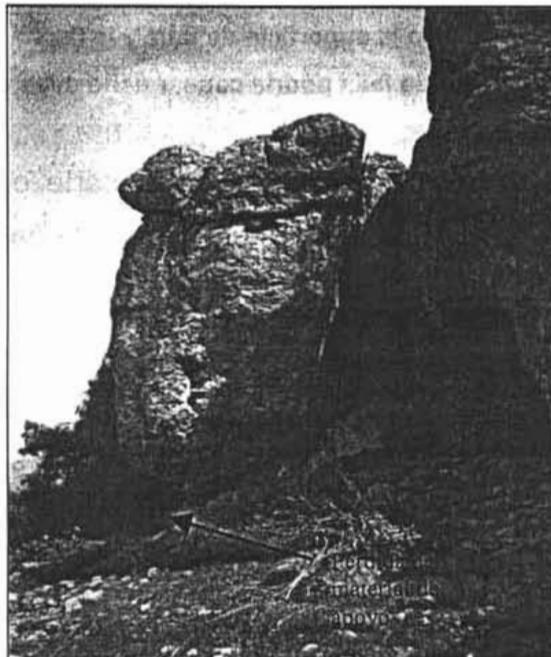


Fig. IV.3.6 Bloque con posibilidad de voltear.

Falla del bloque rocoso por erosión o pérdida de apoyo al pie, puede presentar caída por rodamiento o bien volteo (Fig. IV.3.7)



IV.3.7 Se observa que el bloque ha perdido gran parte de su apoyo y la hace más inestable.

La reptación se refiere al movimiento más o menos lento ladera abajo, que se presenta en la zona superficial y aún profunda de algunas laderas naturales. Se debe a la combinación de las fuerzas de gravedad con otros agentes (sismos, flujo de agua, reducción de la resistencia de la roca con el tiempo). La reptación se manifiesta por una inclinación de los árboles, postes y elementos similares (Fig. IV.3.8).

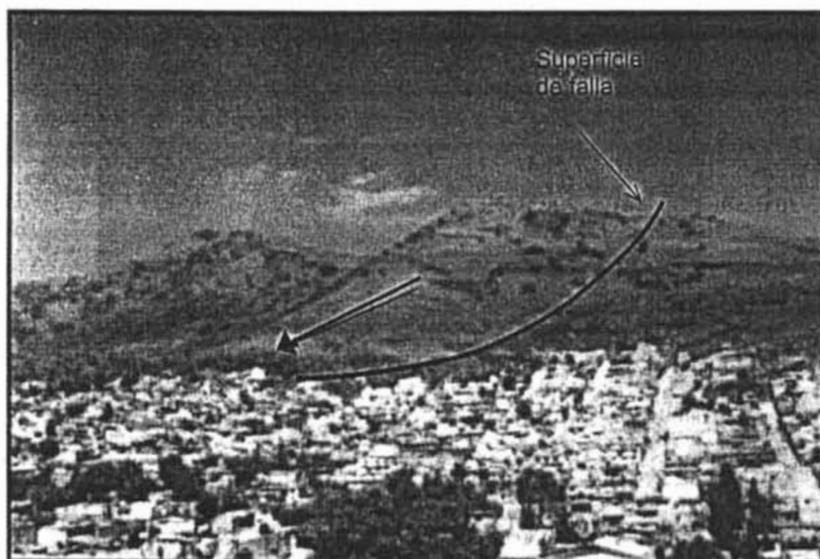


Fig. IV.3.8 Se observa en la foto la superficie de falla y la flecha indica la dirección del movimiento, este mecanismo de falla podría causar daño a las viviendas en un futuro.

Los mecanismos de falla presentes en la parte oriental de la Sierra de Guadalupe fueron identificados mediante un trabajo de campo. Se cartografiaron los lugares donde se puede presentar un deslizamiento. También se realizó una descripción detallada de cada bloque, los datos se registraron en fichas. (anexos)

Los resultados obtenidos de las visitas a campo se cartografiaron en un mapa de inventarios (Fig. IV.3.9) que son las zonas de extensión con mecanismos de falla identificados y con diferente color para indicar el tipo de mecanismo de falla dominante. En total se cartografiaron cerca de 109 zonas de inestabilidad, las cuales están distribuidas de la siguiente forma (Servicio Geológico Metropolitano 2003), tabla IV.1

MECANISMO DE FALLA	IDENTIFICADOS
Caídas por desprendimiento	3
Caídas por rodamiento	31
Deslizamiento	3
Volteo	52
Flujo	5
Más de 2 Peligros (caída, deslizamiento o volteo)	15
Total	109

Tabla IV.1 Tabla de los mecanismos de falla presentes en la parte oriental de la Sierra de Guadalupe.

De la tabla se define la distribución de los mecanismos de falla, presentándose en mayor cantidad el volteo el cual afecta principalmente al municipio de Ecatepec con 36 zonas identificadas y el municipio de Tlalneantla con 16 zonas, respectivamente, sigue caída por rodamiento con 23 y 8 mecanismos identificados de la misma forma y en menor proporción los restantes. Aunque esto no implica que sean los únicos que existan ya que otros pueden estar ocultos debido a la vegetación, la mancha urbana u otros factores.



Mecanismos de falla

-  Volteo
-  Caída
-  Deslizamiento
-  Flujo
-  Más de 2 Mecanismos
Caída, deslizamiento o volteo

Simbología

-  Circos de Erosión
-  División Municipal

Edición cartográfica: Celia López

Escala 1: 25 000



Fig. IV.3.9 Mapa de inventarios

V.- TRATAMIENTOS GEOTÉCNICOS PARA LOS MECANISMOS DE FALLA ENCONTRADOS EN LA PARTE ORIENTAL DE LA SIERRA DE GUADALUPE

V.1 TRATAMIENTOS PARA ESTABILIDAD DE TALUDES ROCOSOS

En el estudio de un talud es necesario, el diseño de medidas para estabilizarlo, existiendo una amplia variedad de tratamientos a adoptar en función de las condiciones de cada caso.

Los estudios para la estabilización de un talud, deben de iniciarse con un conocimiento detallado de las propiedades intrínsecas de los materiales, la geometría del talud y los factores externos que influyen en su inestabilidad.

A partir de un análisis detallado de los problemas presentes debe estudiarse la aplicación de las distintas medidas de estabilización más adecuadas a cada caso. La aplicación de uno u otro tratamiento de estabilización requiere de una importante valoración previa, desde un punto de vista técnico y económico, con objeto de definir las soluciones más adecuadas.

En seguida se muestran algunos tratamientos para estabilizar taludes. En casos particulares pueden aplicarse otras técnicas, o combinaciones de varias de ellas, para resolver problemas concretos (Normas RENFE, 1999).

MODIFICACIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL TALUD

Cuando un talud es inestable una forma de evitar el deslizamiento consiste en modificar su geometría, con el fin de obtener una nueva configuración que resulte estable. Esta actuación es posible en taludes excavados en laderas de pendiente suave, pues en caso contrario el modificar la geometría del talud implicaría un notable aumento de su altura. Con este procedimiento se pretende reducir las fuerzas desestabilizadoras, mediante el incremento de las tensiones normales en la superficie de rotura.

Las formas de actuar sobre la geometría del talud para mejorar su estabilidad son las siguientes:

A) MODIFICACIÓN DEL TALUD

Consiste en la eliminación de una masa inestable o potencialmente inestable obteniendo un nuevo perfil del talud. Es una solución que debe ser aplicada en casos extremos. Se ha de comprobar que la nueva configuración del talud no sea inestable.

B) EXCAVACIONES EN CABECERA

Consiste en la eliminación de material de la parte superior de la masa potencialmente inestable. En esta zona es donde el peso del material contribuye en mayor medida al deslizamiento, pues la superficie de rotura suele tener una mayor inclinación. Por ello, la excavación de material en esta zona produce una mejora apreciable de la estabilidad.

C) CONSTRUCCIÓN DE BERMAS INTERMEDIAS

Esta medida suele realizarse durante la etapa de excavación del talud, aunque también es frecuente durante los trabajos de eliminación de una masa inestable. Las bermas, favorecen la estabilidad global del talud, (Fig. V.1) facilitan el proceso constructivo, el acceso a trabajos de mantenimiento, pueden retener desprendimientos de rocas y en ellas pueden instalarse elementos de drenaje superficial y profundo. En general, la estabilidad global de un talud con bermas es muy superior al de un talud de la misma altura con el ángulo de inclinación igual al del escalonado.

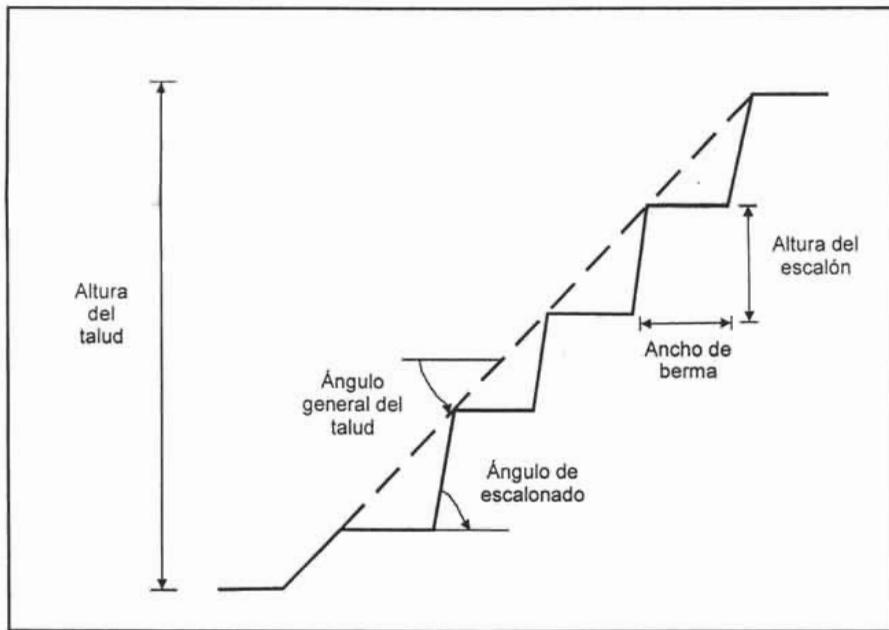


Figura V.1 Talud con bermas intermedias (Normas RENFE, 1999)

MEDIDAS DE DRENAJE

La corrección de un talud mediante medidas de drenaje, tiene como objeto la reducción de las presiones intersticiales del agua que favorecen la inestabilidad del mismo. De este modo se aumenta muy eficazmente la resistencia del talud y disminuyen las fuerzas desestabilizadoras.

La aplicación de estas medidas requiere un conocimiento hidrogeológico detallado, que permita la aplicación de sistemas de drenaje más adecuados en cada caso. Las medidas habituales de drenaje son de dos tipos:

A) DRENAJE SUPERFICIAL

El drenaje superficial tiene dos finalidades:

- Evitar que las aguas superficiales se infiltren en la zona de coronación del talud, en grietas, etc., lo que provocaría un aumento importante de las presiones intersticiales.
- Evitar en lo posible los efectos erosivos de las aguas de escorrentía sobre la superficie del talud.

Las soluciones más comunes son las siguientes:

a) Excavaciones de cunetas de drenaje

Estas cunetas suelen situarse paralelamente al talud y su objetivo es captar y conducir las aguas de escorrentía superficial fuera del talud. Según la situación que ocupan en el talud se denominan:

- Cuneta de coronación.
- Cuneta de berma.
- Cuneta de base o de pie.

Es recomendable la impermeabilización de las cunetas de drenaje ya que mejora notablemente el funcionamiento de estos elementos al evitar la infiltración a través de las propias cunetas. Puede hacerse mediante concreto, láminas impermeables, etc.

b) Sellado de grietas

El sellado de grietas en los taludes impide la penetración de la escorrentía superficial, evitando así el desarrollo de procesos de inestabilidad. Dicho sellado suele efectuarse mediante el relleno de las grietas con concreto, mortero, etc.

B) DRENAJE PROFUNDO

Los drenajes profundos consisten en conductos u orificios que penetran en el talud recogiendo el agua contenida en el mismo, provocando un descenso en el nivel freático. Los más habituales son:

- a) Drenes horizontales o californianos.
- b) Zanjas con relleno drenante.
- c) Galerías de drenaje.
- d) Pozos verticales.

ANCLAJES

Los anclajes son armaduras metálicas alojadas en el interior del terreno y perforados desde la superficie. Se emplean como medida estabilizadora en taludes construidos en roca y suelo.

Los anclajes trabajan a tracción y colaboran en la estabilidad del talud en dos formas (Fig. V.2):

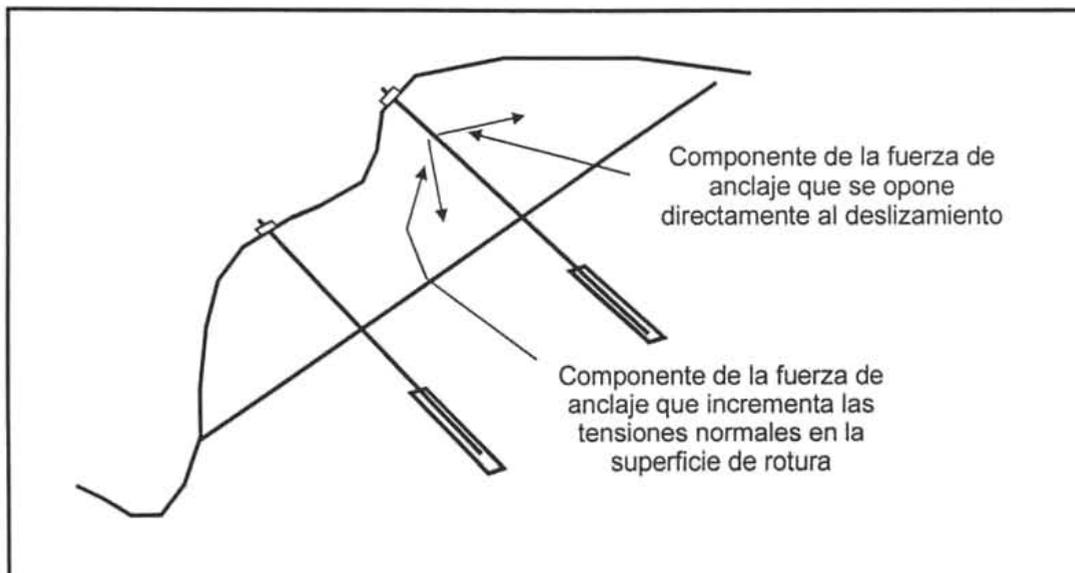


Figura V.2 Efecto estabilizador de un anclaje (Normas RENFE, 1999)

- Proporcionando una fuerza contraria al movimiento de la masa deslizante.
- Incrementando las tensiones normales en la superficie de rotura, aumentando así la resistencia al corte.

La longitud de los anclajes suele ser mayor de 10 m. y el diámetro de perforación variable entre 75 y 125 mm. Los anclajes constan de tres partes (Fig. V.3)

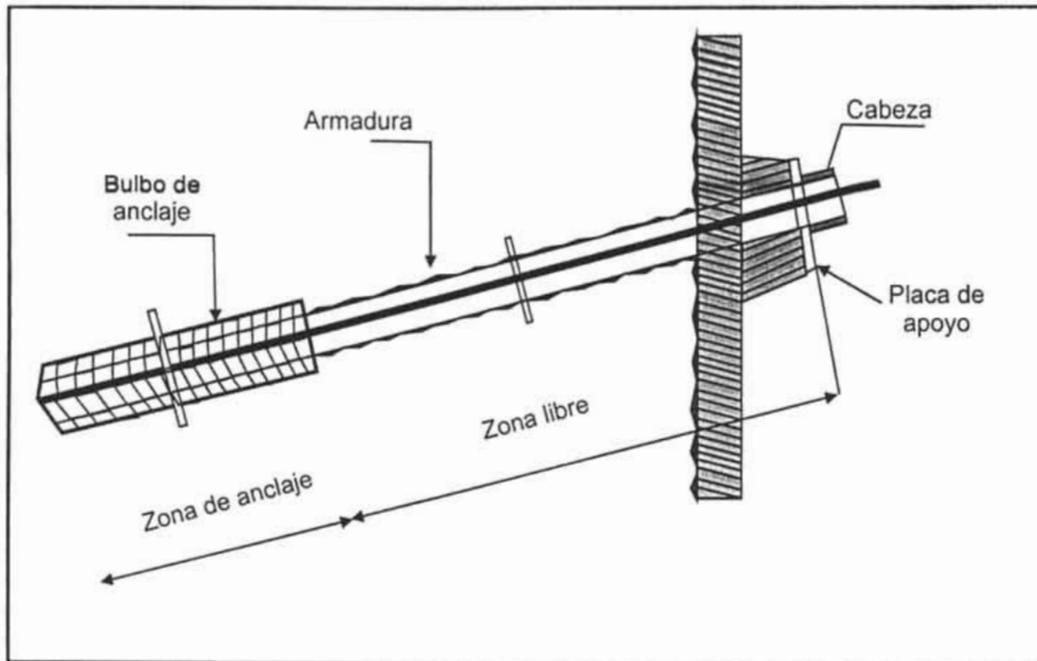


Figura V.3 Esquema de un anclaje (Normas RENFE, 1999)

- Zona de anclaje: Parte solidaria al terreno encargada de transferir los esfuerzos al mismo.
- Zona libre: Unión entre la zona de anclaje y la superficie del talud. La barra o cable de acero puede deformarse libremente al ponerse en tensión.
- Cabeza: Contacto entre el anclaje y la superficie del talud mediante una placa de apoyo.

Los anclajes se pueden clasificar en función de diversos conceptos:

- Según el tipo de servicio:
 - Anclajes provisionales: Se trata de una estabilización temporal hasta la aplicación de otros elementos resistentes que lo sustituyan.
 - Anclajes permanentes: tienen carácter de medida de estabilización definitiva.
- Según su forma de trabajo:
 - Anclajes pasivos: el anclaje entra en funcionamiento al producirse el movimiento del terreno.

- Anclajes activos: al instalarlo se tensa hasta su carga admisible, reservándose parte de su capacidad resistente para un posible movimiento del terreno.
 - Anclajes mixtos: se tensa una carga menor a la admisible, reservándose gran parte de su capacidad resistente para un posible movimiento del terreno.
- Según su naturaleza:
 - Cables de acero: contruidos por cordones de alambres de acero.
 - Barras de acero: denominados bulones o pernos de anclajes, cuando su longitud es de pocos metros.

Los anclajes se recomiendan para la estabilización de deslizamientos en roca de gran magnitud, donde suelen utilizarse en combinación con muros o vigas de concreto, pilotes, etc., cuando por problemas de espacio o características singulares de la rotura, no son viables otras medidas estabilizadoras. En las Fig. V.4 a, V.4 b y V.4 c se muestran algunas disposiciones de anclajes.

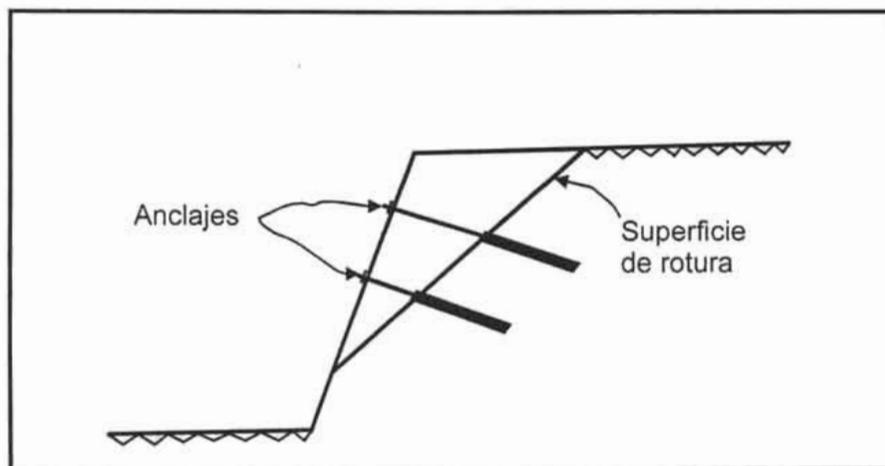


Figura V.4 a Anclajes para estabilizar la falla por deslizamiento (Normas RENFE, 1999)

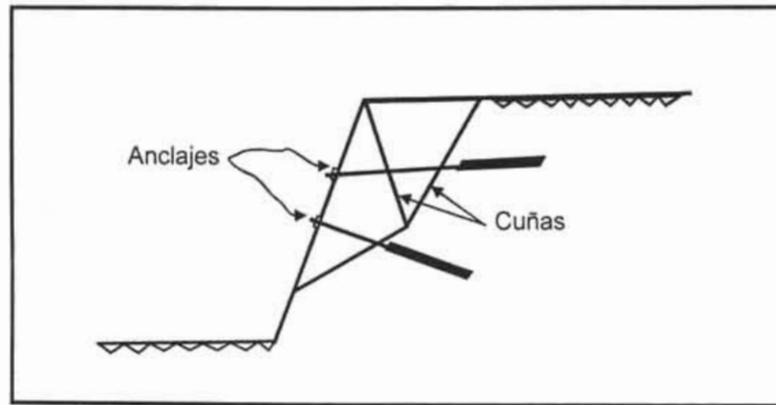


Figura V.4 b Anclajes para estabilizar falla por deslizamiento de cuñas (Normas RENFE, 1999)

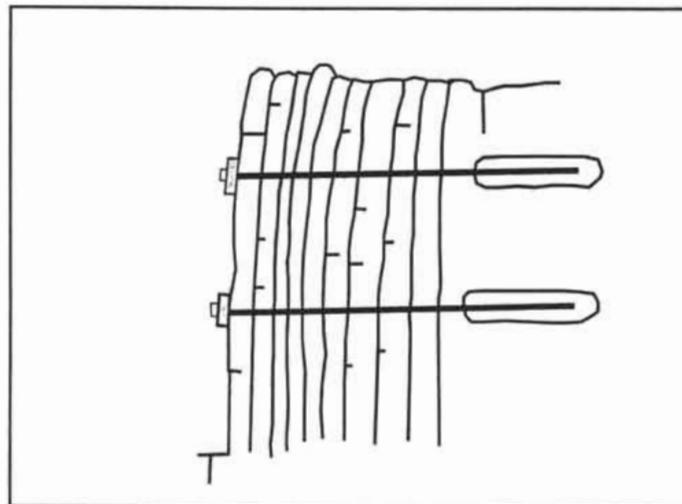


Figura V.4 c Anclajes para estabilizar falla por volteo (Normas RENFE, 1999)

MUROS

Los muros son estructuras empleadas habitualmente como elementos de contención de deslizamientos existentes o potencialmente existentes en taludes.

Los muros para estabilizar taludes de roca se clasifican en dos grupos (Fig. V.5 a y V.5 b)

- Muros de contención: se excava el terreno y se construye a continuación para contener un terreno inestable.
- Muros de revestimiento: protegen al terreno de la erosión y meteorización, al tiempo que contribuyen a su estabilidad.

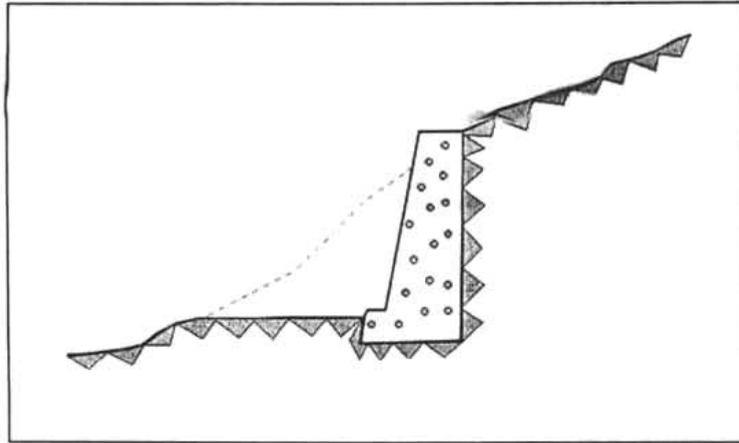


Figura V.5 a Muro de contención (Normas RENFE, 1999)

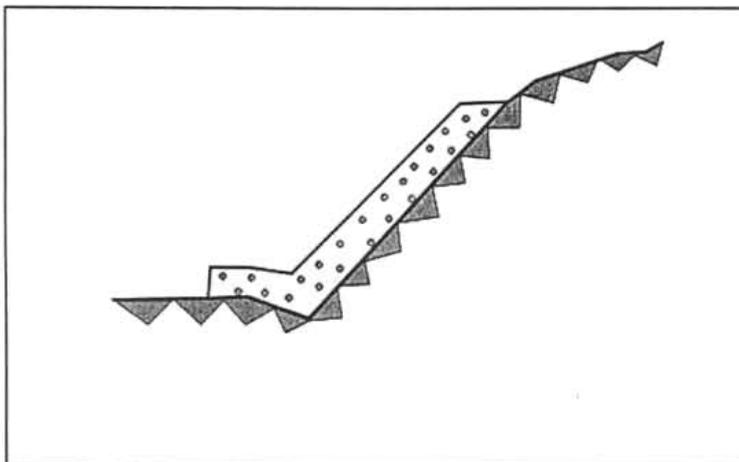


Figura V.5 b Muro de revestimiento (Normas RENFE, 1999)

A la hora de proyectar la construcción de un muro para estabilizar un talud, han de efectuarse las siguientes comprobaciones:

- Estabilidad global del conjunto terreno-muro al deslizamiento.
- Estabilidad general del muro al volteo y al deslizamiento.
- Resistencia del terreno de cimentación.
- Resistencia estructural del muro.

Los muros más frecuentemente empleados se clasifican según su naturaleza, geometría y modo de trabajo en:

A) MUROS DE GRAVEDAD

Son elementos pasivos en los que el peso propio es la acción estabilizadora fundamental. Generalmente se construyen de concreto, aunque existen muros antiguos y de poca altura, contruidos de ladrillos, sillares o mampostería.

Este tipo de muros no debe emplearse para alturas mayores de 10 m. Destaca su facilidad constructiva y su relativo bajo costo. Se utiliza cuando se dispone del espacio suficiente para su construcción al pie del talud, el terreno de cimentación tiene una capacidad importante adecuada y no son previsibles asientos significativos. No son recomendables para condiciones hidrogeológicas muy desfavorables.

B) MUROS ALIGERADOS

En su construcción se emplea la menor cantidad de concreto que en los muros de gravedad. Los dos tipos fundamentales son:

- a) Muros en L: Son muros de concreto armado en los que el parámetro vertical actúa en voladizo y contrarresta el momento de volteo por el peso de tierras situadas bajo el talón.
- b) Muros de contrafuertes: Los contrafuertes pueden disponerse en el intradós o en el tradós. En el primer caso el muro actúa como un muro de gravedad aligerado. En el segundo caso se trata de un muro en L reforzado con contrafuertes exteriores. Los muros en L con contrafuertes son más utilizados.

C) MUROS DE APEO O DE RECALCE

Se instalan en los taludes en roca en los que existen masas importantes de roca en voladizo (Fig.V.6). Su misión es proporcionar un apoyo a dichas masas con el fin de evitar su desprendimiento. Para ello se rellena el espacio bajo el saliente con concreto.

Adecuados para taludes en roca de elevada inclinación, alternancia de estratos duros y blandos, cavidades cársticas y salinas, etc.

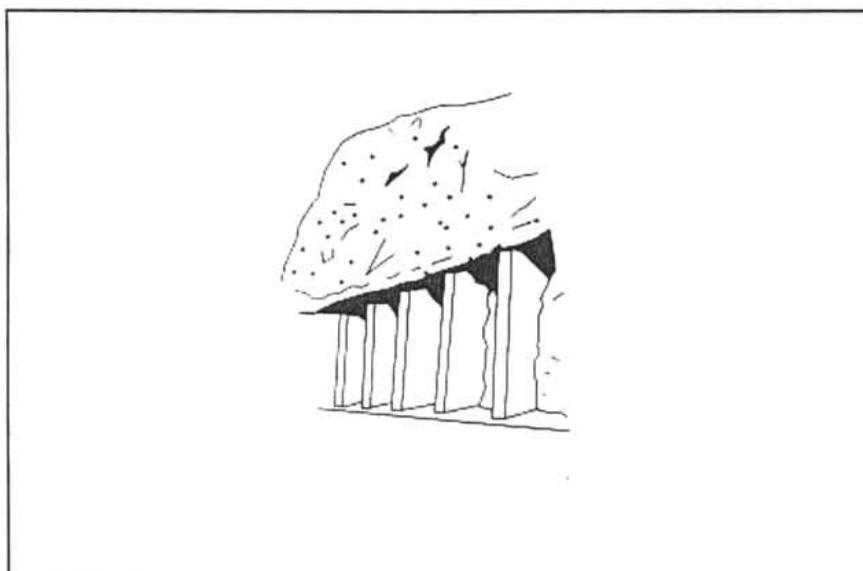


Figura V.6 Muro de apeo de contrafuertes (Normas RENFE, 1999)

D) MUROS ANCLADOS

Los muros reforzados con anclajes constituyen una solución mixta que elimina los problemas de estabilidad por volteo y deslizamiento de un muro convencional.

Adecuados para taludes en roca de mala calidad con orientación desfavorable de discontinuidades y tamaño elevado de bloques o masas de roca inestables con presencia de agua es necesaria la realización de drenaje o combinarlas con drenajes californianos.

PROTECCIÓN CONTRA EL DESPRENDIMIENTO DE ROCA

Los taludes realizados en terrenos rocosos inestables suelen presentar problemas de desprendimientos, los cuales representan un riesgo elevado de daños en la infraestructura.

Existen numerosas medidas para el control de desprendimientos, los cuales se agrupan en:

- Medidas activas o de estabilización: contribuyen al control de los desprendimientos en roca de forma activa, impidiendo el movimiento de los bloques rocosos.
- Medidas pasivas o de protección: su objeto es controlar los bloques de roca que se han movido de su lugar de origen.

MEDIDAS ACTIVAS O DE ESTABILIZACIÓN

a) Eliminación de bloques

Consiste en la eliminación de forma controlada de los bloques sueltos o potencialmente inestables con riesgo de caída (Fig. V.7). Aplicable principalmente a taludes de roca.

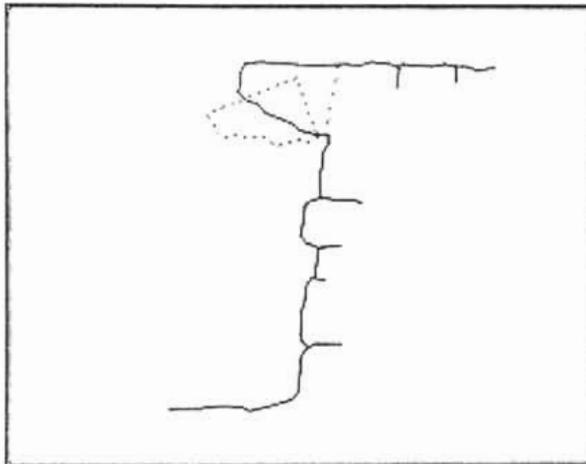


Figura V.7 Eliminación de bloques (Normas RENFE, 1999)

Se pueden llevar a cabo mediante diferentes técnicas:

- Voladura controlada
- Cemento expansivo
- Fragmentación mediante martillo picador
- Elevación desde la parte superior del talud mediante grúas, usando ganchos anclados a los bloques.
- Eliminación manual mediante palancas

Deben eliminarse únicamente los bloques adecuados, en caso contrario el efecto puede ser perjudicial para la estabilización de otros bloques a lo largo plazo.

b) Fijación de bloques

Fijación de bloques de roca de tamaño medio mediante barras de acero de diámetro medio de 20 a 40 mm y longitud normal de 3 a 6 m. Las barras se colocan en perforaciones realizadas en la roca y rellenas de mortero o resina. (Fig. V.8)

Cuando los bloques o masas de roca a estabilizar presentan grandes dimensiones, su fijación debe realizarse mediante anclajes. Los anclajes permiten fijar los bloques de roca a mayor profundidad en el macizo rocoso y admiten la aplicación de grandes tensiones.

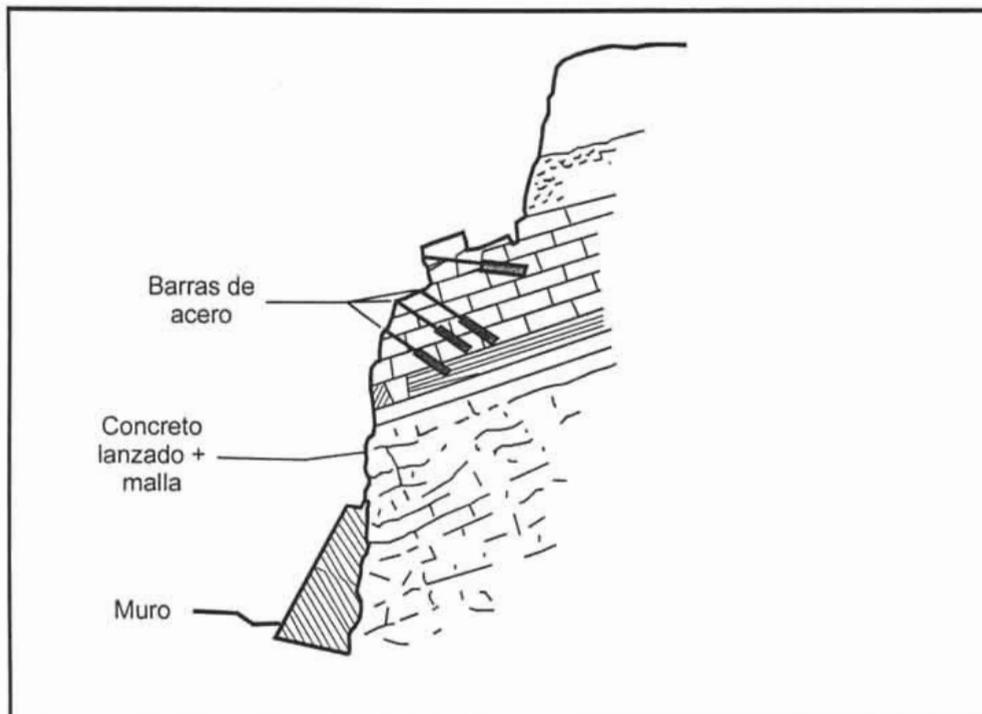


Figura V.8 Fijación de bloques y concreto lanzado (Normas RENFE, 1999)

c) Atado de bloques

Consiste en la estabilización de un bloque o conjunto de bloques de roca sueltos, mediante cables que se disponen en torno al bloque y cuyos extremos se anclan a la superficie del talud. (Fig. V.9). Se utiliza generalmente para grandes bloques ($10 - 25 \text{ m}^3$) siendo su aplicación muy limitada. El atado se puede realizar con una envoltura de malla tupida que se ancla a la zona estable.

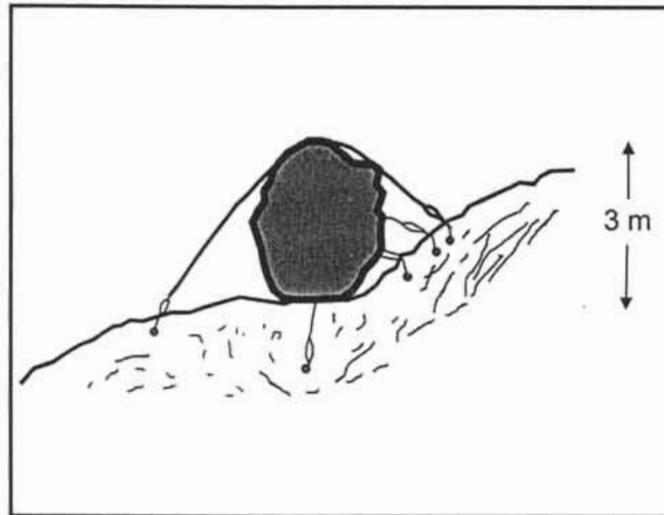


Figura V.9 Atado de bloques (Normas RENFE, 1999)

d) Sistema mixto de cables y malla

Se utiliza para estabilizar zonas del talud que se encuentran muy fracturadas. Consiste en la colocación de una pantalla metálica, preferentemente de doble o triple torsión, sujeta a la roca potencialmente inestable o generadora de desprendimientos. A la malla se superpone una serie de cables formando una retícula para anclar a la roca en sus extremos. (Fig. V.10)

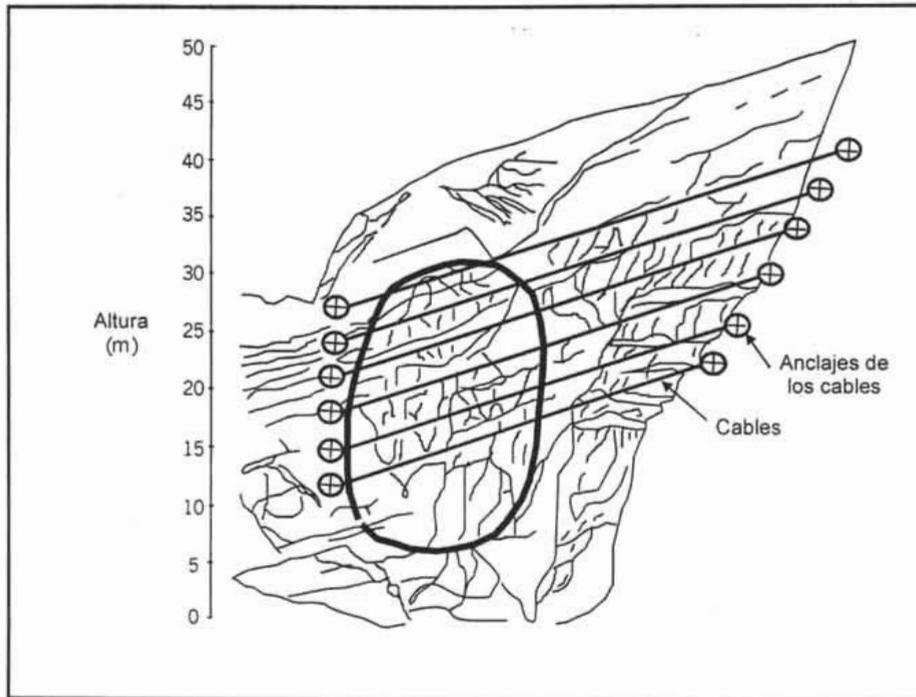


Figura V.10 Sistema mixto de cables y malla (Normas RENFE, 1999)

e) Concreto lanzado

Consiste en la proyección de una capa de concreto sobre la superficie del talud. Dicha capa de concreto puede reforzarse mediante la aplicación de una malla metálica fijada al talud sobre la que se proyecta el concreto.

Esta medida es útil para evitar pequeños desprendimientos y para proteger la superficie del talud de la erosión, cuyo desarrollo puede favorecer la aparición de bloques inestables. Asimismo, es una medida adecuada para evitar la infiltración de agua de lluvia y escorrentía superficial. Para facilitar la salida de agua deben realizarse drenes que atraviesan la capa de concreto.

MEDIDAS PASIVAS O DE PROTECCIÓN

a) Malla de guiado

Son mallas de alambre de acero tendidas desde la parte superior del talud o desde bermas intermedias, cubriendo la superficie del talud rocoso hasta su pie.

La función de estas mallas es la de guiar o conducir los bloques de roca en su caída con el fin de que se acumulen en el pie del talud. (Fig. V.11)

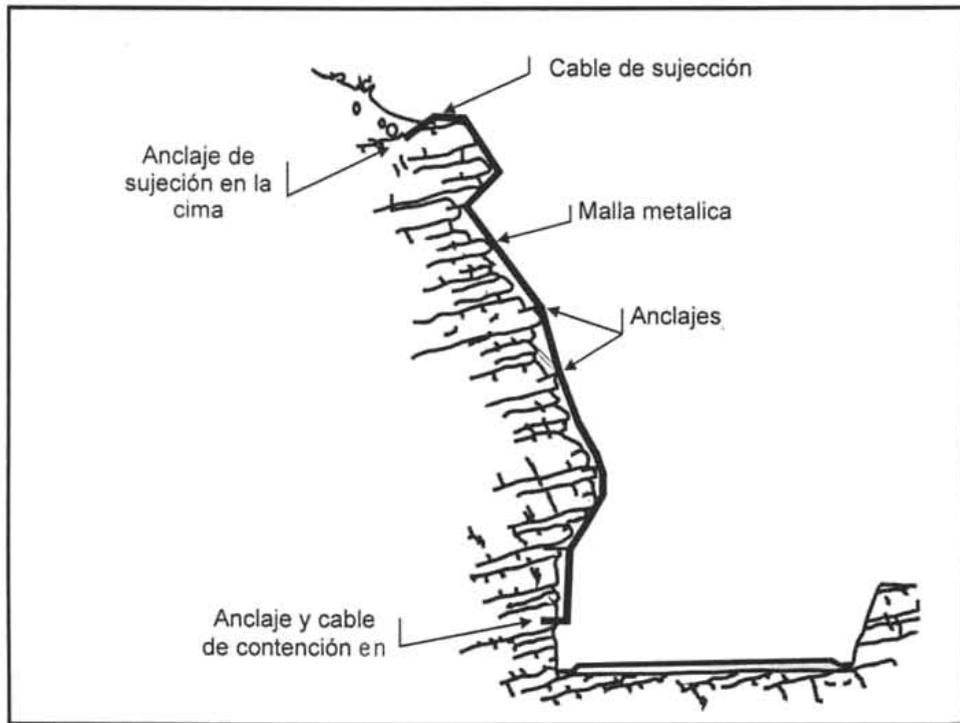


Figura V.11 Malla de guiado con anclajes intermedios (Normas RENFE, 1999)

Consecuentemente, los bloques que potencialmente se desprenderán del talud deben de ser de un volumen inferior a 0.5 metros cúbicos para evitar el arrastre, desprendimiento o rotura de la malla de guiado.

En los casos que no hay una cuneta o espacio suficiente para la acumulación de rocas al pie del talud, las mallas deben ser unidas a la superficie del talud mediante piquetas metálicas. De este modo, las rocas no alcanzan el pie del talud, quedando retenidas próximas a su lugar de origen.

b) Mallas de sostenimiento

Las mallas de sostenimiento son mallas de alambre de acero de triple torsión preferentemente, que se anclan en el borde superior del talud a una distancia del mismo de aproximadamente 1 m, tendiéndose en la superficie del

talud y volviéndose a anclar en la base del mismo, con unos elementos que se puedan quitar y reponer para limpiar las caídas del material.

En la superficie, se disponen, de acuerdo con el cálculo, unos anclajes que sujetan la malla al talud mediante una retícula de cables de acero. Dichos cables refuerzan el conjunto de la estructura estabilizando los bloques de roca inestable de mayor tamaño.

c) Cunetones de pie

Consisten en zanjas que se sitúan al pie de los taludes para la recogida de los bloques rocosos desprendidos. En función de sus dimensiones puede utilizarse tanto para desprendimiento de pequeña roca como de gran magnitud.

Para favorecer la recogida y parada de los bloques se puede cubrir el fondo de la zanja con una capa de grava o de tierra. A si mismo, las paredes deben ser los más verticales posibles para que los bloques no superen la zanja por rodamiento. Cuando las paredes son tendidas pueden disponer de una malla detrás de la zanja. (Fig. V.12)

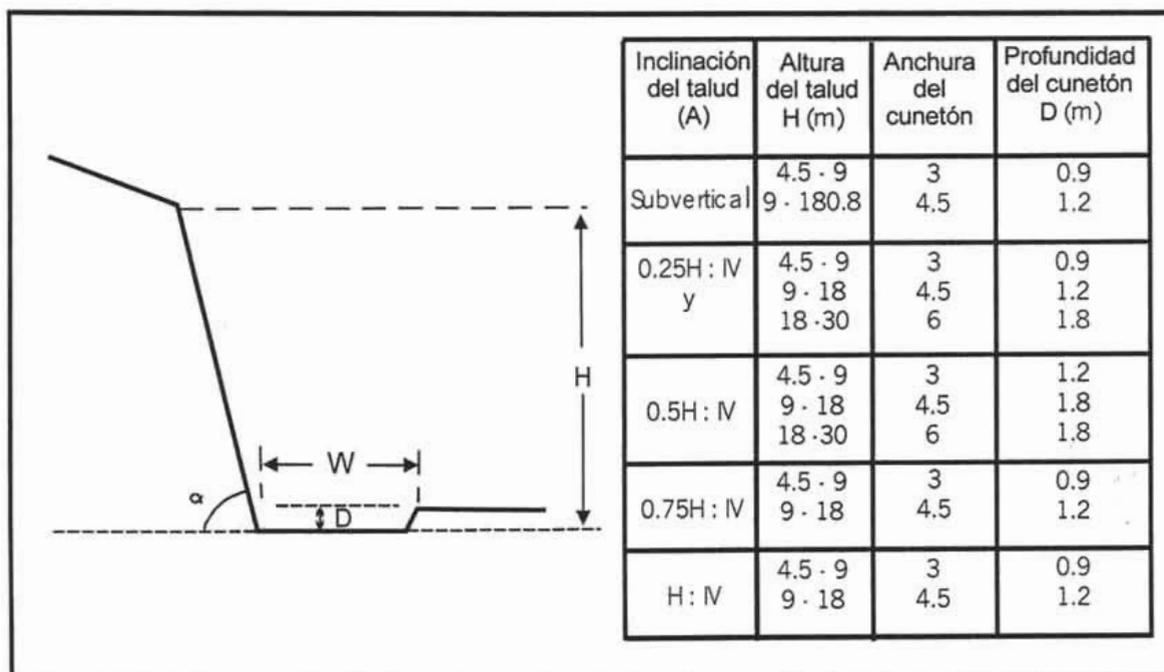


Figura V.12 Dimensionamiento de cunetones de pie (Normas RENFE, 1999)

d) Muros de contención de pie

Esta medida consiste en la colocación de un muro al pie del talud para detener los bloques de roca desprendidos. Los muros utilizados son fundamentalmente de concreto, de gaviones o caballones de tierra. Los muros de gaviones y los caballones de tierra son más efectivos que los muros de concreto, pues presentan un comportamiento más flexible y su recuperación es más sencilla. (Fig. V.13)

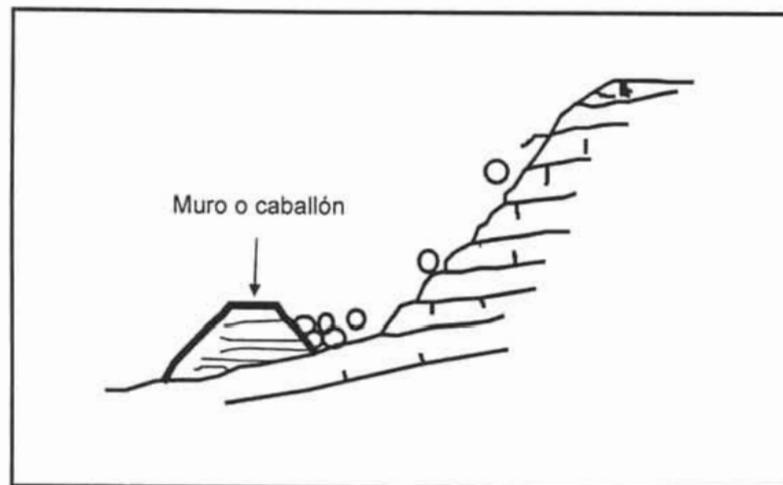


Figura V.13 Muros de contención de pie (Normas RENFE, 1999)

e) Barreras de contención

Consiste en la instalación de barreras ligeras en la superficie o al pie del talud, con el fin de interceptar a los bloques rocosos en su trayectoria de caída. Dentro de las barreras se pueden distinguir las estructuras rígidas convencionales y las estructuras flexibles o dinámicas desarrolladas más recientemente, capaces de absorber altas energías mediante deformaciones elásticas y plásticas.

Las barreras dinámicas consisten en mallas de cable de acero entrelazado, soportadas por unos postes de acero. Los postes van cimentados al terreno y anclados mediante cables. Los cables de las barreras presentan unos elementos de frenado mediante fricción que pueden absorber y disipar una gran energía. Estas barreras son aplicables para desprendimientos de roca cuya energía cinética de llegada no exceda los 2.000 KJ. La altura estándar de las barreras es

de 3 m, aunque se pueden construir de 5 ó 6 m. Las barreras estáticas pueden estar constituidas por postes metálicos y redes, vigas de acero o carriles hincados con travesaños de madera, etc. No absorben energía de impacto, sino que su comportamiento es únicamente elástico. Son apropiados para desprendimientos de pequeña magnitud.

PROTECCIÓN CONTRA LA EROSION

La erosión es un proceso de degradación natural que afecta principalmente a los taludes en suelos, aunque también tiene repercusión en los de roca. El principal agente erosivo que afecta a los taludes es el agua, dando la escorrentía superficial como el impacto directo de las gotas de lluvia.

Las soluciones para la protección se agrupan en medidas de drenaje superficial, los cuales limitan en gran medida la escorrentía superficial sobre el talud, y medidas de vegetación del talud.

SIEMBRA DE TALUDES

El mantenimiento de una cubierta vegetal en un talud produce indudables efectos beneficiosos, de los que destacan:

- La absorción de agua por las raíces produce un drenaje de las capas superficiales del talud.
- Aumento de resistencia al esfuerzo cortante en superficie por el efecto estabilizador de las raíces

Para la siembra de taludes se emplean especies herbáceas y arbustivas, y en algunos casos, incluso árboles. Las especies deben ser capaces de adaptarse a las condiciones a las que van a estar sometidas (clima, tipo de suelo, exposición al sol, etc.). En términos generales son convenientes especies de raíces profundas y alto grado de transpiración, lo que indica un mayor consumo de agua.

V.2 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD PARA LOS MECANISMOS POTENCIALES DE FALLA PRESENTES.

Una vez reconocidos los mecanismos de falla presentes en la parte oriental de la Sierra de Guadalupe, la primera etapa en el análisis consiste, en verificar si realmente el talud es inestable y si requiere medidas correctivas.

En muchos casos, las fallas en taludes adyacentes sirven de advertencia para poder identificar un mecanismo. Sea cual sea la causa de la duda, lo esencial es investigar la estabilidad del talud en cuestión y luego aplicar las medidas que se consideren necesarias si es el caso.

El análisis se llevara acabo por medio del factor de seguridad (F.S.) para taludes. El factor de seguridad es la relación entre las fuerzas estabilizadoras y desestabilizadoras que actúan a lo largo de la superficie de ruptura. La condición de equilibrio limite se cumple cuando $F.S. = 1$.

La selección del factor de seguridad debe hacerse en función del método de cálculo utilizado y su grado de fiabilidad, del nivel de intensidad de investigaciones de campo, de la cantidad, calidad y representatividad de los ensayos de laboratorio.

Es usual considerar un $F.S. = 1.2$ para taludes en los cuales la solución es solo temporal y un $F.S. = 1.5$ para los cuales la solución será permanente.

Los métodos de equilibrio límite son los más utilizados en el análisis de estabilidad de taludes, están ampliamente contrastados en la práctica y se conocen sus límites y grados de confianza.

Los problemas de inestabilidad son estáticamente indeterminados, por lo que para su resolución es preciso considerar una serie de hipótesis de partida según los métodos. Los métodos de equilibrio límite están basados en:

- El principio de equilibrio límite.
- El criterio de rotura de Mohr-Coulomb.
- La definición de factor de seguridad.
- La elección de la superficie de rotura a analizar.

Asimismo se asumen las hipótesis:

- La superficie de rotura presenta una geometría tal que permite el deslizamiento, es decir, será una superficie cinemáticamente posible.
- La distribución de esfuerzos en equilibrio en la superficie de rotura se calcula utilizando datos conocidos (peso volumétrico del material, presión del agua, etc.)
- Se asume que la resistencia se moviliza simultáneamente a lo largo de todo el plano de rotura.

En términos generales, los análisis de equilibrio límite implican el cálculo de las fuerzas desestabilizadoras y de las fuerzas resistentes a lo largo de la superficie de rotura.

El análisis se llevara acabo para los siguientes mecanismos de falla localizados en la parte oriental de la Sierra de Guadalupe:

- Análisis por volteo singular.
- Análisis por deslizamiento.

ANÁLISIS POR VOLTEO SINGULAR

Para el análisis por volteo se deben considerar las condiciones más sencillas que lo propician, las cuales se pueden deducir con el modelo de un bloque que descansa sobre un plano inclinado. En este caso, la forma del bloque

es tan importante como su peso. La forma viene definida por la altura H y por el ancho B (Fig V.2.1.), (Hoek y Bray, 1996).

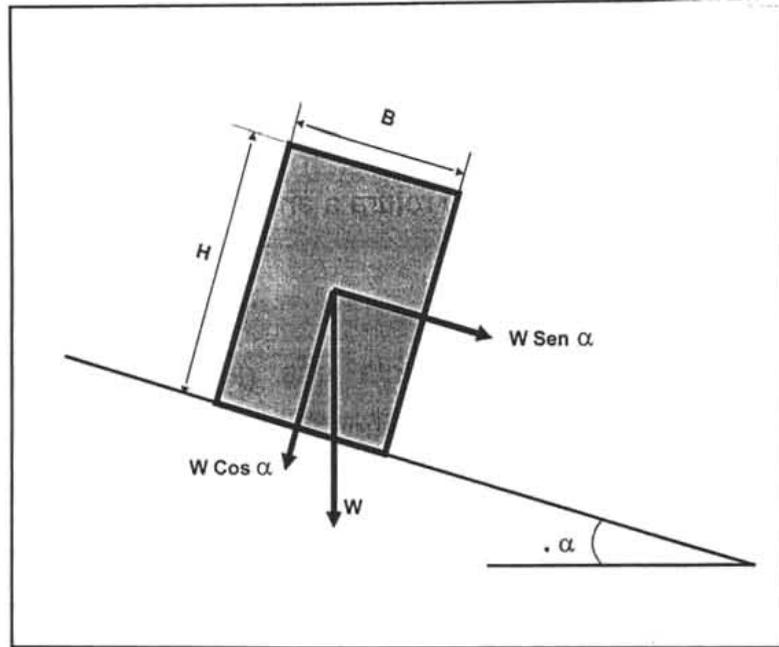


Figura V.2.1 Configuración geométrica de un bloque en un plano inclinado.

El volteo lo determina la posición del vector peso con relación a la base del bloque. Si el vector peso, que normalmente pasa por el centro de gravedad del bloque, llegara a caer fuera de la base, causaría un volteo.

El análisis por volteo se realiza considerando las fuerzas estabilizadoras y las desestabilizadoras. Para lo cual se hace una sumatoria de momentos ($\sum M_0$) con respecto al punto más desfavorable, en este caso es 0 (Fig. V.2.2).

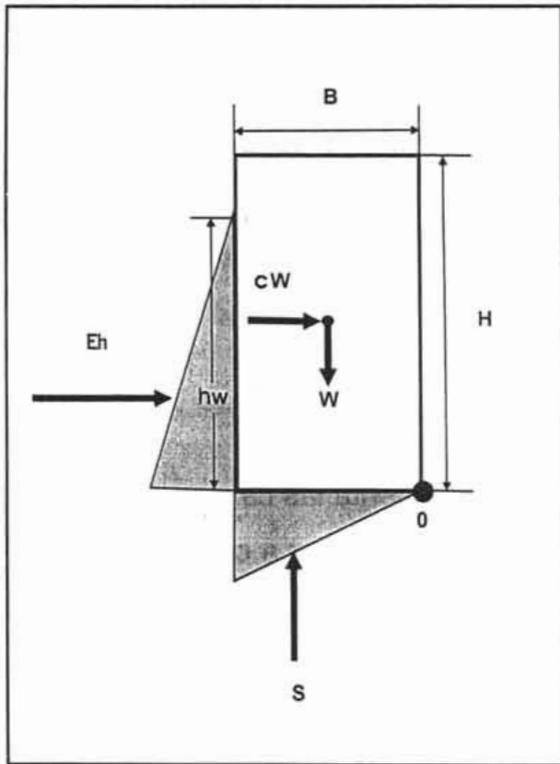


Figura V.2.2 Modelo para el análisis por volteo.

Donde:

L: largo del bloque

B: Ancho del bloque

H: Altura del bloque

hw: Altura del agua en la grieta

c: Coeficiente sísmico

W: Peso del bloque

S: Subpresión

CW: fuerza sísmica

El factor de seguridad se define como:

$$F.S = \frac{\sum M_{res}}{\sum M_{act}}$$

Donde: F.S. = Factor de seguridad

Mres. = Momento resistente

Mact. = Momento actuante

Análisis por empuje hidrostático

$$\sum Mr = W \cdot \frac{B}{2}$$

$$\sum Ma = \frac{\gamma w \cdot hw^3}{6} + \frac{\gamma w \cdot hw \cdot B^2}{3}$$

$$F.S. = \frac{w \cdot \frac{B}{2}}{\frac{\gamma w \cdot hw^3}{6} + \frac{\gamma w \cdot hw \cdot B^2}{3}}$$

Análisis por sismo

$$\Sigma Mr = W \cdot \frac{B}{2}$$

$$\Sigma Ma = \frac{c \cdot W \cdot H}{2}$$

$$F.S. = \frac{w \cdot \frac{B}{2}}{\frac{c \cdot W \cdot H}{2}}$$

El análisis se realizara para un bloque que presenta las características para presentar el mecanismo de falla por volteo. Para poder llevar a cabo el análisis es necesario conocer propiedades de interés como son: el peso volumétrico, el ángulo de fricción y la cohesión.

Estos propiedades se pueden estimar indirectamente utilizando tablas y clasificaciones que permitan ubicar la roca dentro de un rango de valores. Se escogen los valores que mejor se adapten a las características de la roca. El peso volumétrico de la roca se obtuvo cortando un trozo dacita para obtener una geometría regular y poder calcular el volumen. Con el volumen y el peso se obtuvo el peso volumétrico. Los datos fueron:

$$W = 406.5 \text{ gr}$$

$$L = 7.1 \text{ cm}$$

$$B = 4.5 \text{ cm}$$

$$H = 6 \text{ cm}$$

$$V = 191.7 \text{ cm}^3$$

El peso volumétrico es:

$$\gamma = W/V = 406.5/191.7 = 2.12 \text{ gr/cm}^3$$

Estos datos son aplicables para todos los análisis ya que se trata del mismo tipo de roca. El bloque en estudio es el siguiente:

ANÁLISIS DE ESTABILIDAD POR VOLTEO

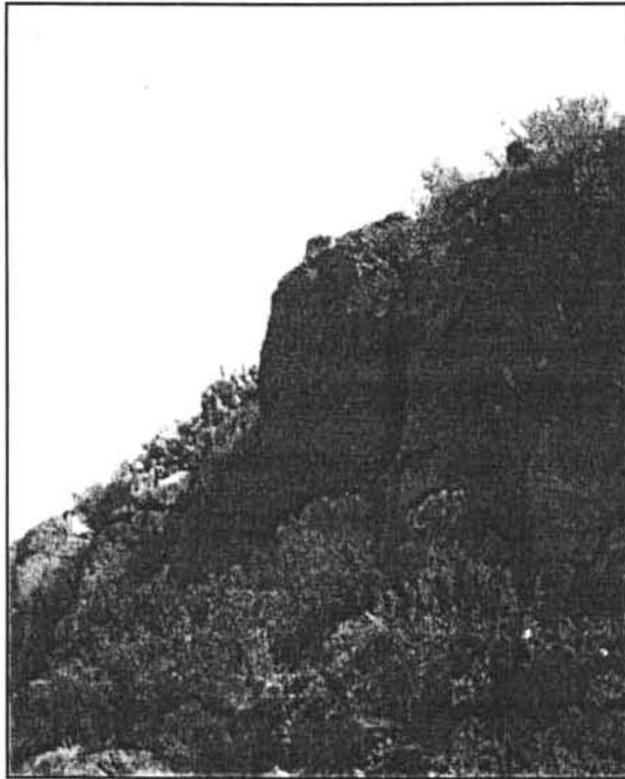
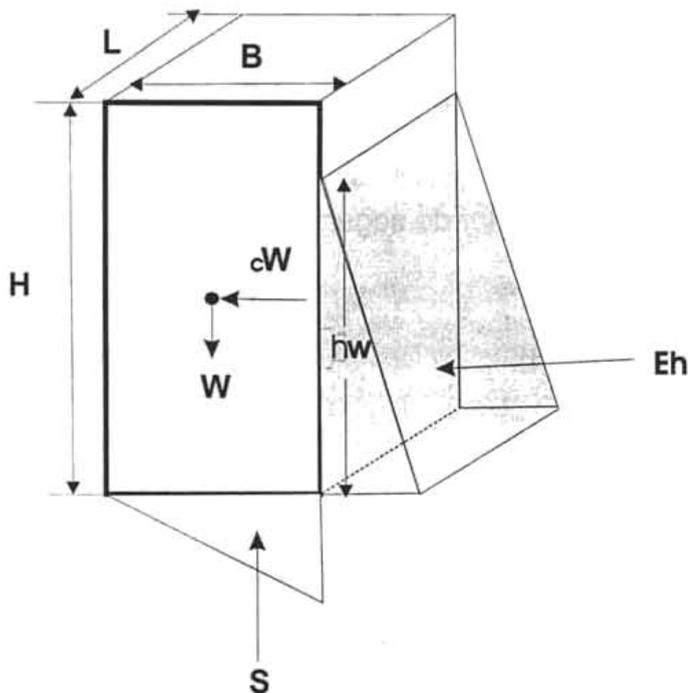


DIAGRAMA DE CUERPO LIBRE DEL BLOQUE



Donde:

L: Largo del bloque
B: Ancho del bloque
H: Altura del bloque
hw: Altura del agua en la grieta
c: Coeficiente sísmico
W: Peso del bloque
Eh: Empuje horizontal
S: Subpresión
CW: Fuerza sísmica

Los valores del factor de seguridad considerando un aumento en de agua en la grieta se muestra en la tabla V.5

hw	FS
0.5	12.5
1	6.1
1.5	3.9
2	2.8
2.5	2.1
3	1.6
3.5	1.3
4	1.0
4.5	0.8
5	0.7

Tabla V.5 Comportamiento del F.S. al aumentar el nivel de agua en la grieta.

Otra forma de observar el comportamiento del factor de seguridad al aumentar el agua en la grieta es con la grafica FS VS Hw (Figura V.2.3)

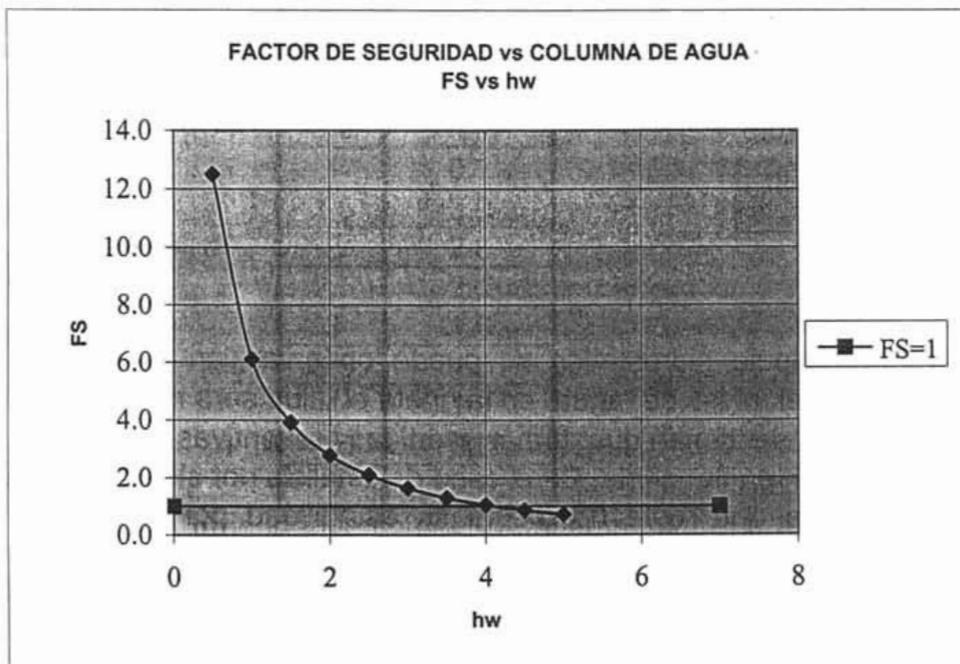


Figura V.2.3 Grafica de FS vs hw

ANÁLISIS POR SISMO

$$F.S. = \frac{\sum M_r}{\sum M_a}$$

Donde: FS: Factor de seguridad
Mr: Momento resistente
Ma: Momento actuante

$$\sum M_r = W \cdot \frac{B}{2}$$

$$\sum M_a = \frac{c \cdot W \cdot H}{2}$$

$$F.S. = \frac{w \cdot \frac{B}{2}}{\frac{c \cdot W \cdot H}{2}}$$

Para el análisis por sismo se toma un valor de coeficiente sísmico $c = 0.16$ que se obtiene de la carta de regionalización sísmica. En este caso no se considera el empuje hidrostático, ya que sería una condición extraordinaria el encontrar ambos casos juntos. El Factor de seguridad obtenido para este caso es el siguiente:

$$\sum M_r = 32.8125$$

$$\sum M_a = 10.5$$

F.S. =	3.1
--------	-----

Del análisis de empuje hidrostático se puede observar en la tabla que conforme aumenta el nivel de agua en la grieta el talud será más inestable, lo cual indica que se tienen que tomar medidas preventivas para evitar el empuje hidrostático en la grieta. En el caso del análisis por sismo el factor de seguridad indica que este no afecta su estabilidad por lo cual no es necesario realizar un tratamiento.

ANÁLISIS POR DESLIZAMIENTO

El análisis por deslizamiento de falla plana es un fenómeno relativamente raro en los taludes de roca pues pocas son las veces en que ocurren al mismo tiempo las condiciones geométricas que se requieren para producirla.

Condiciones geométricas para la falla plana

Para que ocurra un deslizamiento sobre un solo plano, es preciso que se satisfagan las siguientes condiciones geométricas (Hoek y Bray, 1996), (Fig. V.2.4):

- El plano sobre el cual ocurre el deslizamiento debe tener por fuerza un rumbo paralelo o casi paralelo (dentro de aproximadamente $\pm 20^\circ$) a la cara del talud.
- El plano de falla tiene por fuerza que aflorar en la cara del talud. Eso significa que su buzamiento deberá ser menor que el buzamiento de la cara del talud, esto es, $\beta > \alpha$.
- El echado del plano de falla debe ser mayor que el ángulo de fricción en dicho plano, esto es, $\alpha > \phi$.
- También por fuerza deben existir en la masa rocosa superficies de liberación que no opongan resistencia al deslizamiento. Estas superficies de liberación definen los límites laterales del deslizamiento. Otra alternativa es que la falla ocurra en un plano de falla que pase por la "nariz" convexa de un talud.

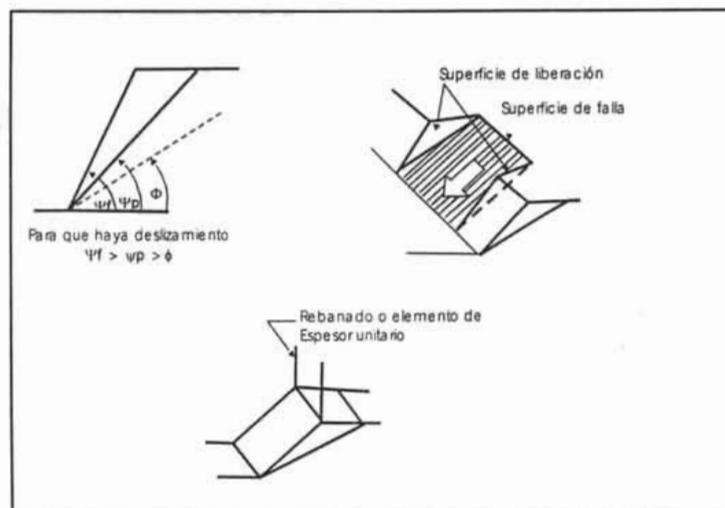


Figura V.2.4 Condiciones para la falla por deslizamiento (Hoek y Bray, 1996)

Lo usual en el análisis de problemas bidimensionales es considerar una rebanada o elemento de espesor unitario, sacada en ángulos rectos con respecto a la cara del talud. Esto significa que se pueden representar de una parte y en un corte vertical, el área de la superficie visible; y, por la otra, el volumen del bloque que se desliza, con el área de la figura que lo delimita.

La configuración geométrica del talud considerado en este análisis se define en la (Fig. V.2.5 y V.2.6). Nótese que son dos los casos por examinar:

- a) Un talud que tiene una grieta de tensión en la superficie superior.
- b) Un talud con una grieta de tensión en la cara.

En este análisis se supone lo siguiente:

- a) Tanto la superficie de deslizamiento como la grieta de tensión tienen un echado paralelo al de la cara del talud.
- b) La grieta de tensión es vertical y está llena de agua hasta una profundidad Z_w .
- c) El agua entra a la superficie de deslizamiento por la base de la grieta de tensión y escurre a lo largo de esta superficie hasta escapar a la presión atmosférica por el plano de falla donde aflora en la cara del talud. La distribución de presiones inducidas por el agua en la grieta de tensión y en la superficie de deslizamiento se ilustra en la figura V.2.5.
- d) Las fuerzas W (el peso del bloque que se desliza), U (la fuerza de subpresión debida a la presión del agua sobre la superficie de deslizamiento) y V (la fuerza debida a la presión hidrostática en la grieta por tensión) actúan a través del centroide de la masa que se desliza. En otras palabras, se supone que no se inducen momentos que produzcan rotación del bloque, por tanto la falla es únicamente por deslizamiento. Aunque esta hipótesis quizá no sea estrictamente cierta para la mayoría de los taludes reales, los errores que pudieran cometerse al hacer caso omiso de los momentos son lo suficientemente pequeños como para despreciarlos. Sin embargo, en taludes escarpados con discontinuidades cuyo buzamiento es muy pronunciado conviene tener en mente la posibilidad de una falla por volteo.

- e) La resistencia al corte de la superficie de deslizamiento se define por la cohesión c y un ángulo de fricción ϕ , que están ligados por la ecuación $\tau = c + \sigma \tan \phi$.
- f) Se considera una rebanada de espesor unitario y se supone que hay superficies de liberación, de manera que no hay resistencia al deslizamiento en los límites laterales de la falla.

El factor de seguridad esta dado por la fuerza que se opone al deslizamiento dividida entre la fuerza que tiende a inducirlo para cada caso son los siguientes:

Factor de seguridad para deslizamiento con grieta de tensión en la superficie superior.

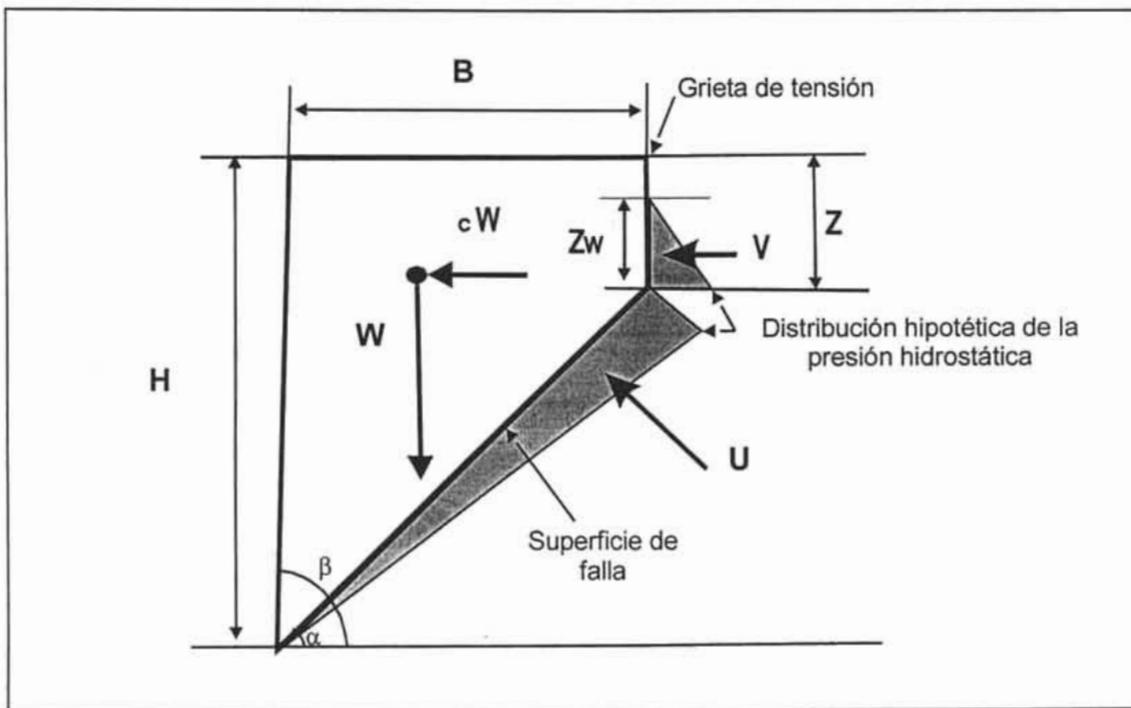


Figura V.2.5 Modelo teórico para análisis por deslizamiento con grieta de tensión (Hoek y Bray, 1996)

$$F.S. = \frac{cA + (W \cdot (\cos \alpha - c \cdot \operatorname{sen} \alpha) - U - V \cdot \operatorname{sen} \alpha) \tan \phi}{W(\operatorname{sen} \alpha + c \cdot \operatorname{cos} \alpha) + V \cdot \operatorname{cos} \alpha}$$

$$A = (H - z) \cdot \operatorname{Cosec} \alpha$$

$$W = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot H^2 \cdot \left(\left(1 - \left(\frac{z}{H} \right)^2 \right) \cot \alpha - \operatorname{Cot} \beta \right)$$

$$U = \frac{1}{2} \gamma_w \cdot z_w \cdot A$$

$$V = \frac{1}{2} \gamma_w \cdot z_w^2$$

Donde: F.S. = Factor de seguridad

A = Área de contacto para el deslizamiento

W = Peso del bloque

U = Empuje hidrostático en la grieta de tensión

V = Empuje hidrostático en la superficie de deslizamiento

Factor de seguridad para deslizamiento con grieta de tensión en la cara de deslizamiento

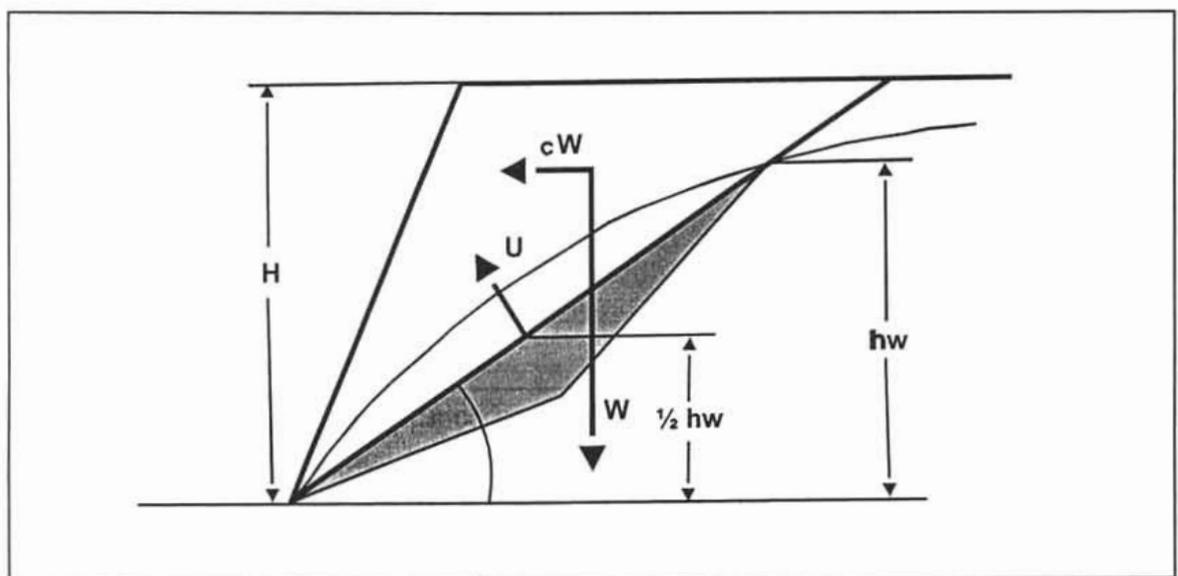


Figura V.2.6 Modelo teórico para análisis por deslizamiento (Hoek y Bray, 1996)

$$F.S. = \frac{C \cdot A + (W \cdot (\cos \alpha - c \sin \alpha) - U) \cdot \tan \phi}{W(\sin \alpha + c \cdot \cos \alpha)}$$

$$A = (H - z) \cdot \operatorname{Cosec} \alpha$$

$$W = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot H^2 \cdot \left(\left(1 - (z/H)^2 \right) \cot \alpha - \cot \beta \right)$$

$$U = \frac{1}{4} \gamma_w \cdot h_w^2 \cdot \operatorname{Cosec} \alpha$$

Donde: F.S. = Factor de seguridad

A = Área de contacto para el deslizamiento

W = Peso del bloque

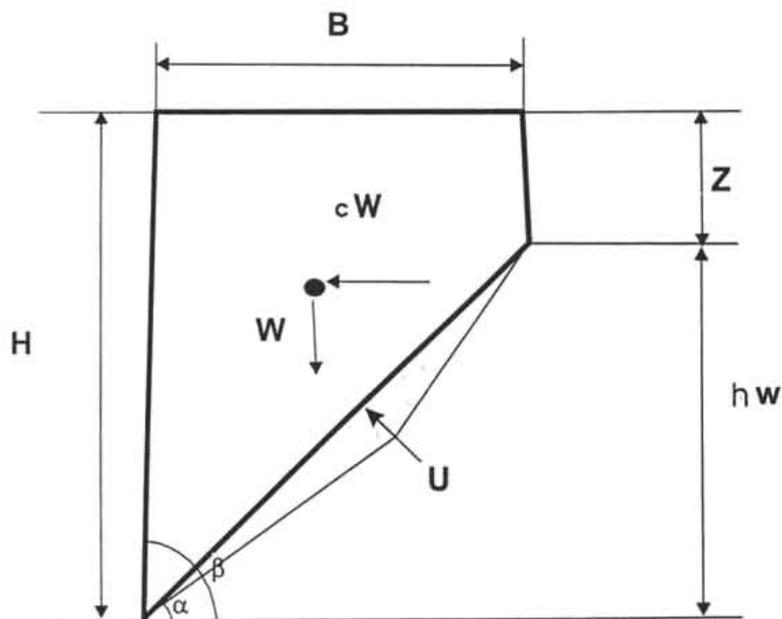
V = Empuje hidrostático en la superficie de deslizamiento

El bloque que se estudiara presenta las características de falla en la cara de deslizamiento. El análisis para el bloque es el que se muestra:

ANÁLISIS DE ESTABILIDAD POR DESLIZAMIENTO



DIAGRAMA DE CUERPO LIBRE DEL BLOQUE



Donde:

B: Ancho del bloque
H: Altura del bloque
c: Coeficiente sísmico
W: Peso del bloque
Z: Altura de la grieta
hw: Altura del agua en la superficie de deslizamiento
 α : Ángulo de la superficie de deslizamiento
 β : Ángulo del talud
U: Subpresión
cW: Fuerza sísmica

**ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA**

Los datos necesarios para el llevar acabo el analisis del bloque se obtuvieron de campo y se midieron directamente del talud, estos datos son:

H= 5 m
 c= 0.16
 hw= 0.5 m
 C= 0 t/m²
 z= 3.6 m
 γr= 2.1 t/m³
 γw= 1 t/m³
 α= 25°
 β= 89°
 φ= 35°

Con estos datos se procedio a realizar el analisis por empuje hidrostatico y por sismo.

ANALISIS POR EMPUJE HIDROSTATICO

$$F.S.= \frac{\Sigma Mr}{\Sigma Ma}$$

$$F.S.= \frac{C \cdot A + (W \cdot (\cos \alpha - c \cdot \sec \alpha) - U) \cdot \tan \phi}{W(\sin \alpha + c \cdot \cos \alpha)}$$

Donde: F.S.: Factor de seguridad
 Mr: Momento resistente
 Ma: Momento actuante
 A: Area de la superficie de contacto
 W: Peso del bloque
 U: Empuje hidrostatico en la superficie de deslizamiento

Para el analisis se considerara un valor de agua en la grieta de deslizamiento de 5 m, y asumiendo que no existe cohesión C=0, se tiene el siguiente F.S.

$$A = (H - z) \cdot \operatorname{Cosec} \alpha$$

$$A = 3.31267 \text{ m}^2$$

$$W = \frac{1}{2} \cdot \gamma_r \cdot H^2 \cdot \left(\left(1 - \left(\frac{z}{H} \right)^2 \right) \cot \alpha - \cot \beta \right)$$

$$W = 26.6527 \text{ t/m}$$

$$U = \frac{1}{4} \gamma_w \cdot H^2 \cdot \text{Cosec} \alpha$$

$$U = 1.15944 \text{ t/m}$$

$$\Sigma M_r = 16.102 \quad 16.914$$

$$\Sigma M_a = 11.264 \quad 11.264$$

FS=	1.4
-----	-----

ANÁLISIS POR SISMO

Para el análisis por sismo se considera un valor de coeficiente sísmico de $c=0.16$ obtenido de la carta de regionalización sísmica y una cohesión $C=0$ debido a que no se logró obtener ningún dato de campo. El factor de seguridad para este caso se obtiene de la siguiente expresión:

$$F.S. = \frac{c \cdot A + (W \cdot (\cos \alpha)) \cdot \tan \phi}{W(\sin \alpha)}$$

$$c = 0.16$$

$$\Sigma M_r = 15.652$$

$$\Sigma M_a = 15.1288$$

FS=	1.0
-----	-----

El factor de seguridad para el análisis por empuje hidrostático indica que el bloque no será afectado por el agua. En el caso de sismo el factor de seguridad indica que en caso de ocurrir un sismo se tendrá un factor de seguridad igual a uno, pero se tiene establecido como mínimo un $F.S. = 1.2$, por lo tanto es conveniente realizar un tratamiento al bloque.

V.3 PROPUESTAS GEOTÉCNICAS DE MITIGACIÓN PARA CADA MECANISMO DE FALLA PRESENTE.

Las propuestas para mitigar los mecanismos de falla estarán en función de los análisis realizados a los siguientes mecanismos de falla:

- volteo singular.
- Deslizamiento.

SOLUCIÓN GEOTÉCNICA PARA VOLTEO SINGULAR

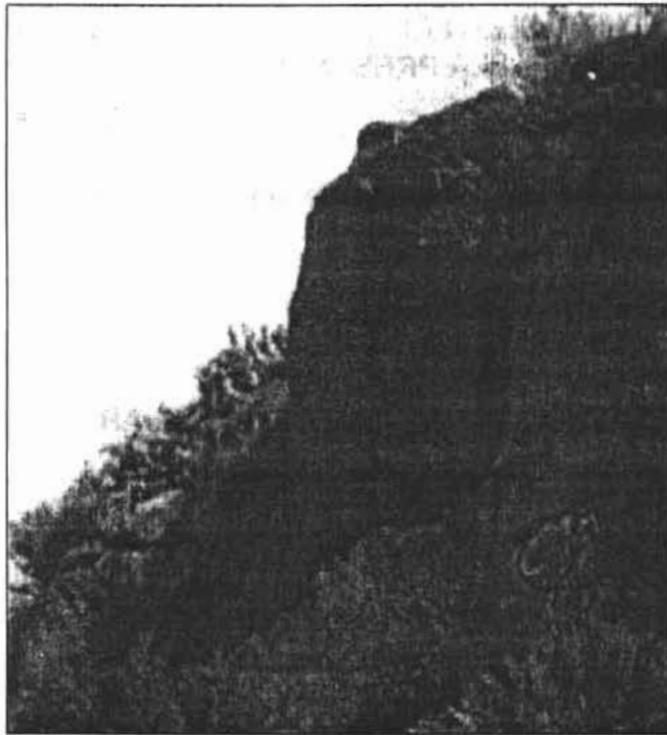
Después del análisis del bloque, en base a los resultados se procede a dar una solución en caso de ser necesaria. Para el análisis por empuje hidrostático se puede observar de la gráfica que a medida que aumenta el nivel del agua en la grieta el factor de seguridad disminuye, cuando se alcanza una altura mayor de 4 m puede presentar una falla, al tener un F. S. < 1 . Lo cual indica que la temporada de lluvias es más propicia para que se presente la falla.

En el caso de análisis por sismo se tiene un F. S. = 3.1, lo cual indica que no se presentaran problemas, por lo cual es importante darle prioridad al empuje hidrostático que es el que puede causar la falla.

La solución para este tipo de falla tendrá que evitar las presiones hidrostáticas. El tratamiento para este bloque es el siguiente:

- Retiro de la arcilla que está en la grieta y tala de raíces de hierba o arbustos que están creciendo dentro de la misma.
- Sellado de la grieta con mortero fluido $f'c = 100 \text{ kg/cm}^2$

Esta solución garantiza que el bloque no presentara ningún tipo de problema, ya que se tendría un F.S. > 1.5 . La solución propuesta se muestra en la figura V.3.1.



Bloque inestable



Tratamiento para el bloque

Figura V.3.1 Solución geotécnica para el mecanismo de falla por volteo

SOLUCIÓN GEOTÉCNICA PARA DESLIZAMIENTO

La solución para este mecanismo de falla tiene esta función de los resultados de los análisis realizados. Para el caso del empuje hidrostático en la cara de la grieta de tensión considerando una cohesión $c = 0$ se tiene un F.S. = 1.4, lo cual indica que no se presentaran problemas para este caso.

En el análisis por sismo se obtuvo un F.S. = 1 por lo cual es importante dar un tratamiento para evitar que se presenten problemas, ya que es recomendable tener un F.S. > 1.2 .

Para dar solución a este mecanismo de falla se tiene que partir de la ecuación del F.S.

$$F.S. = \frac{C \cdot A + (W \cdot (\cos \alpha - c \sin \alpha) - U) \cdot \tan \phi}{W(\sin \alpha + c \cdot \cos \alpha)}$$

En este caso se considera la cohesión $C = 0$ y la subpresión $U = 0$ al no afectar para el análisis por sismo, quedando la ecuación:

$$F.S. = \frac{(W \cdot (\cos \alpha - c \sin \alpha)) \cdot \tan \phi}{W(\sin \alpha + c \cdot \cos \alpha)}$$

Como se necesita una fuerza que se oponga al movimiento, se debe considerar en los momentos resistentes y se considera como F , quedando la ecuación:

$$F.S. = \frac{(W \cdot (\cos \alpha - c \sin \alpha)) \cdot \tan \phi + F}{W(\sin \alpha + c \cdot \cos \alpha)}$$

Como se tiene que tener un F.S. = 1.5 se despeja F de la ecuación quedando:

$$1.5 = \frac{(26.65 \cdot (0.9063 - 0.16 \cdot 0.4226)) \cdot 0.7002 + F}{26.65 \cdot (0.4226 + 0.16 \cdot 0.9063)}$$

De donde se obtiene:

$$F = 7.402 \text{ t / m}$$

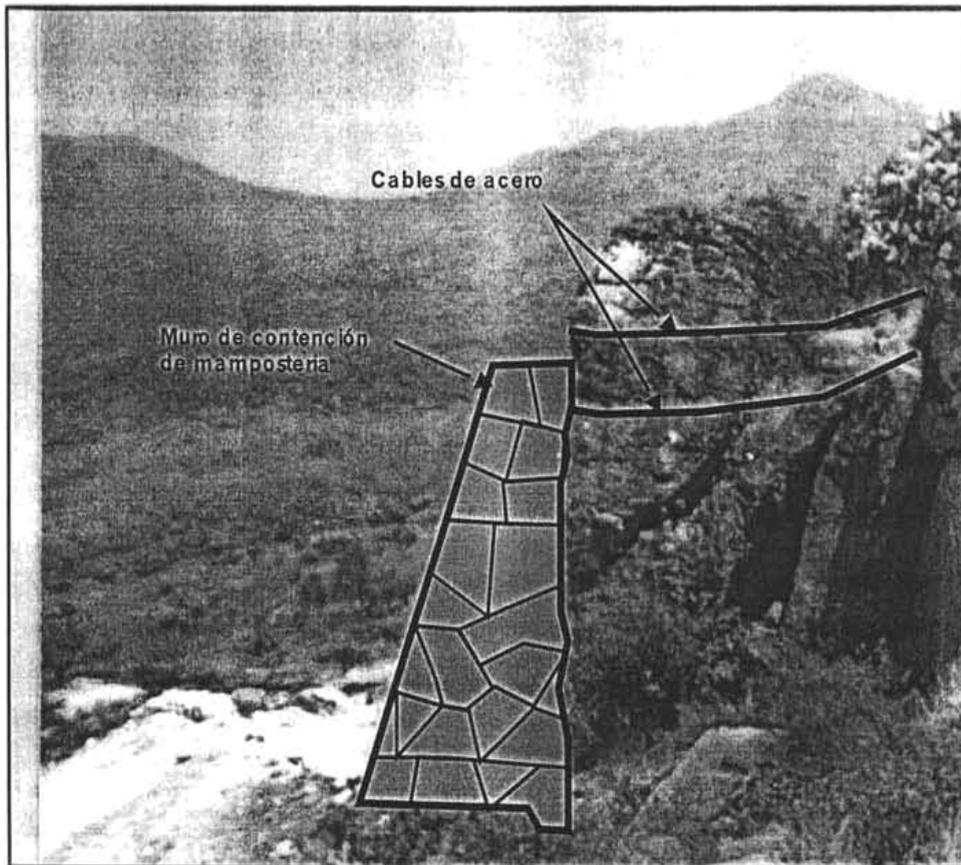
La solución a este mecanismo de falla es obtener el valor de la fuerza F que se oponga al deslizamiento con los tratamientos siguientes:

- Retiro de la arcilla que está en la grieta y tala de hierba que afecte a la misma.
- Excavación hasta alcanzar roca, para desplantar un muro de roca.
- Construcción de un muro de mampostería masivo utilizando bloques de piedra sana junteados con mortero cemento-arena 1:5 con acabado aparente en una cara.
- Colocación de 2 cables de torón de acero de $\frac{3}{4}$ " y 1" para retención del bloque con separación de 1.5. Tensado de cables a 3 t / m y amarre con "perros" en los extremos de sujeción.

Con esta solución se garantiza que el bloque no deslizara al tener un F.S. = 1.5. La solución propuesta es como se muestra en la figura V.3.2.



Bloque inestable



Tratamiento geotécnico para el bloque

Figura V.3.2. Solución geotécnica para la falla por deslizamiento

VI.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el presente estudio se dan a conocer las características geológicas, topográficas y propiedades de los macizos rocosos, los procesos geomorfológicos, los procesos físicos, químicos y de origen humano como factores que afectan la estabilidad de los taludes en la parte oriental de la Sierra de Guadalupe.

Todos los taludes que presentan un mecanismo de falla en la parte oriental de la Sierra de Guadalupe se marcaron en el mapa de inventarios, lo cual será de gran ayuda para trabajos posteriores en los que se quiera analizar y solucionar los taludes que presenten problemas. Los tratamientos aquí mencionados ayudaran en gran medida a tener una idea de como solucionar los mecanismos de falla, sin embargo estos tratamientos no son una solución única, sino que cada sitio tiene una solución específica.

Este estudio no da soluciones específicas para cada mecanismo de falla, ya que es importante que para cada obra civil que se proyecte con el fin de dar solución es necesario realizar estudios geológicos y geotécnicos más a detalle que permitan evaluar el nivel de estabilidad con el fin de obtener la solución más adecuada y sobre todo económica.

Es recomendable evitar construcciones en laderas inestables. Para lo cual dentro del plan de crecimiento de uso del suelo en nuestro país, es importante que cada municipio establezca los límites de crecimiento de sus poblaciones considerando la posibilidad de deslizamientos en la región en donde se localizan, ya que se siguen habitando lugares en donde existe posibilidad de deslizamiento.

Se deben de realizar estudios más a detalle en los lugares marcados como inestables en el mapa de inventarios. Es recomendable reubicar a las personas

que viven en zonas donde pueden existir deslizamientos para evitar posibles accidentes que causarían pérdidas humanas.

Se debe llevar a cabo una reforestación para evitar la inestabilidad y la erosión en las laderas que lo requieran.

En taludes muy fracturados es importante evitar que entre agua en las grietas para evitar las presiones hidrostáticas.

BIBLIOGRAFÍA

Barton, N.R., Choubey, V., 1977. The Shear strength of rock Joints in theory and practice. *Rock Mechanics*. 10, p 1-54.

Brunsdon, D., Mass movement, in *Processes in Geomorphology*, ed. C. Embleton and J. Thornes, Edward Arnold, London.

Cebull, S. E. & Shurbet, D. H., 1987. Mexican Volcanic Belt: and intraplate transform? *Geofísica International* 26,1-14.

Comisión Federal de Electricidad, 1993. *Manual de Diseño de Obras Civiles, Diseño por Sismo CFE y IIE*, México.

García, M. E., 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana): *Sistema de Clasificación Climática: México D.F.*, Instituto de Geografía, 219 p.

Gaziev, E. G., 1984. Estabilidad de los Macizos Rocosos y Métodos de Estabilización, V. No. D-21: México DF, Instituto de Ingeniería UNAM.

Herrera C. S., 2002. *Regionalización de los Deslizamientos en México*.

Herrera C. S., 2002. *Estabilidad de Taludes de Roca*.

Hoek, Evert., Bray, Jonh W., 1996. *Rock Slope Engineering*, Institution of Minning and Metallurgy, tercera edición.

Hutchinson, J.N., 1988. General Report: Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hidrogeology, proceedings of the Fifth International Symposium of Lanslides, Vol. I, editado por Christophe Bonnard.

Jacobo, Albarran, J.J., 1985. Estudio Petrogenético de las rocas ígneas de la porción central del Eje Neovolcánico. Revista del Instituto Mexicano del Petróleo.

Lozano B., L., 1968. Geología de la Sierra de Guadalupe, México, D.F. Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, tesis profesional, 39 p.

Lugo H., J., Salinas M., A., 1996. Geomorfología de la Sierra de Guadalupe (al norte de la Ciudad de México) y su relación con peligros naturales: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v. 13, núm. 2, p. 240-251.

Molnar, P. & Sykes, L. R., 1969. Tectonics of the Caribbean and Middle America regions by focal mechanism and sismicity. Geological society of America Bulletin 80, 1639-1684.

Mooser, F., 1975. Historia geológica de la Cuenca de México, Memoria de las obras del Sistema de Drenaje Profundo, editado por el D.D.F, México.

Normas RENFE., 1999. Proyectos, Estudios Geotécnicos. Explanaciones. Taludes.

Pardo, M. & Suárez, G., 1993. Steep subducction geometry of the Rivera plate beneath the Jalisco Block in Western of Mexico. Geophysics Research Leet. 20, 2391-2394.

Patton, F. D., 1996. Multiple modes of shear failure in rock. Procedimientos del Primer Congreso Internacional de Mecánica de Rocas, Lisboa, VOL I.

SEGEOMET, Servicio Geológico Metropolitano, 2003. Proyecto Evaluación y Zonificación de Peligros Geológicos por Deslizamiento en las laderas de la Sierra de Guadalupe, Estado de México.

ANEXOS

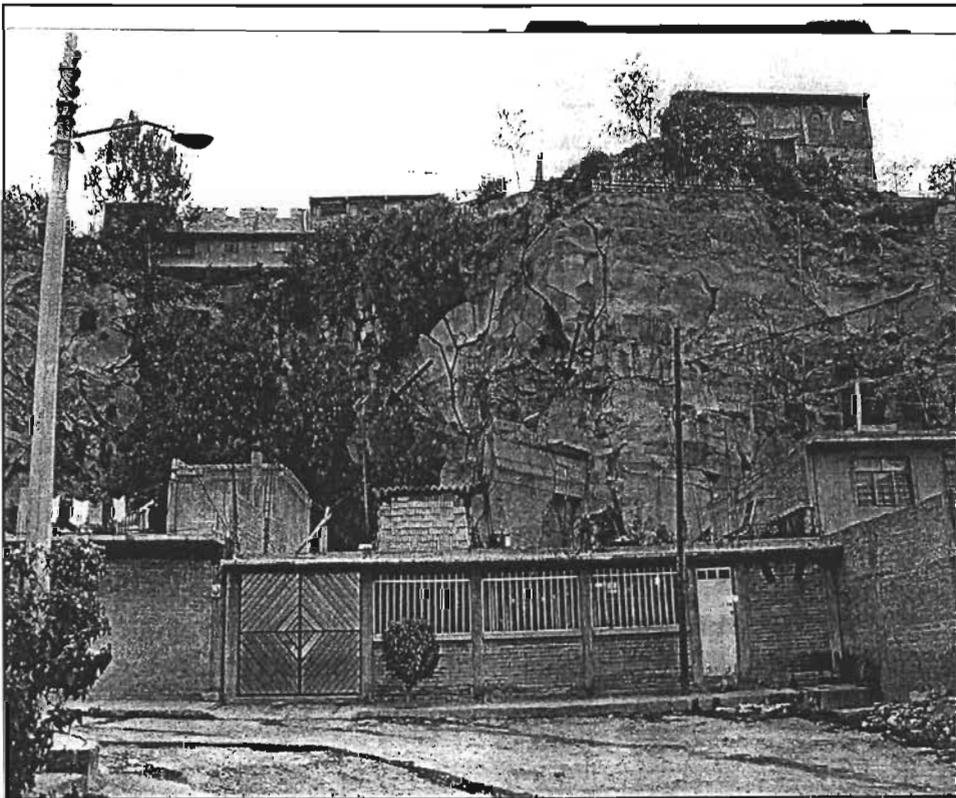
FICHA PARA LOS MECANISMOS DE FALLA

COORDENADAS EN UTM	494,089	2,162,921
CARACTERISTICAS DEL BLOQUE		
Dimesiones	Largo	1
	Ancho	1.5
	Altura	4
	Forma	Irregular
MECANISMO DE FALLA		Caída primaria

OBSERVACIONES

En la fotografía se observa un talud fracturado donde se aprecian bloques con posibilidad de caer por desprendimiento y que afectarían la vivienda. Se pueden apreciar algunos árboles creciendo en el talud, lo cual lo hace más inestable al entrar las raíces entre las grietas y ejercer un empuje.

Las flechas indican la dirección del movimiento de los bloques que pueden desprenderse.

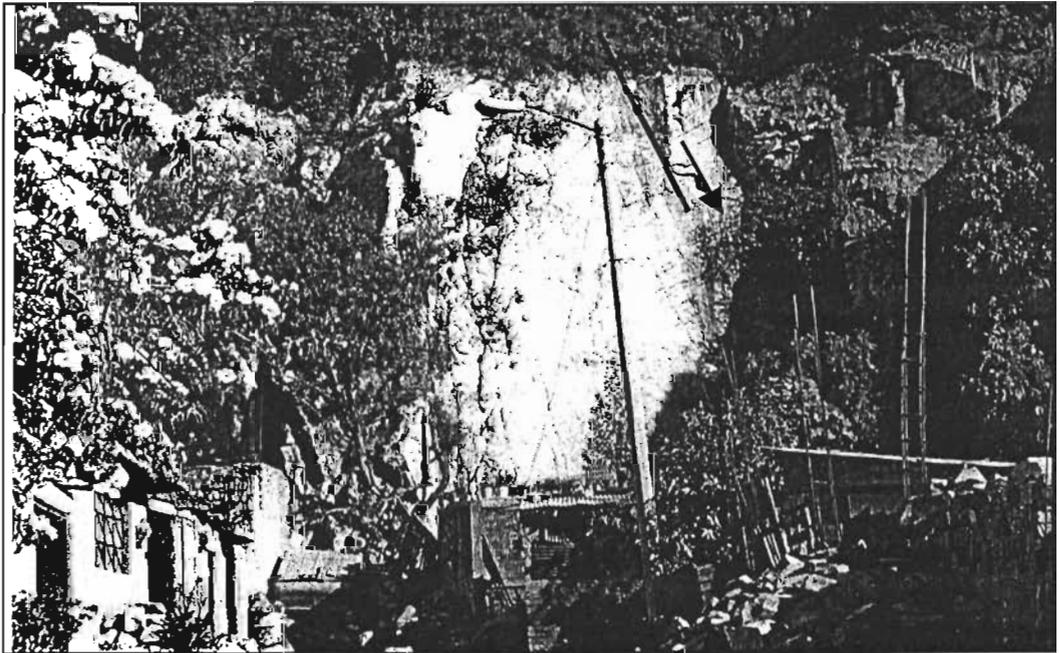


FICHA PARA LOS MECANISMOS DE FALLA

COORDENADAS EN UTM	493.821	2,164,880
CARACTERISTICAS DEL BLOQUE		
Dimensiones	Largo	6
	Ancho	4
	Altura	2
	Forma	Cuña
MECANISMO DE FALLA		Falla plana

OBSERVACIONES

En la foto se observa el corte vertical en un talud rocoso, el cual en la parte superior se aprecia un bloque que puede fallar por deslizamiento y afectar la vivienda que se encuentra al pie del talud. En este mecanismo de falla el agente detonante más importante es el agua, ya que al entrar en la grieta provoca presión de poro. La flecha indica la dirección de movimiento del bloque la línea indica el plano de falla.

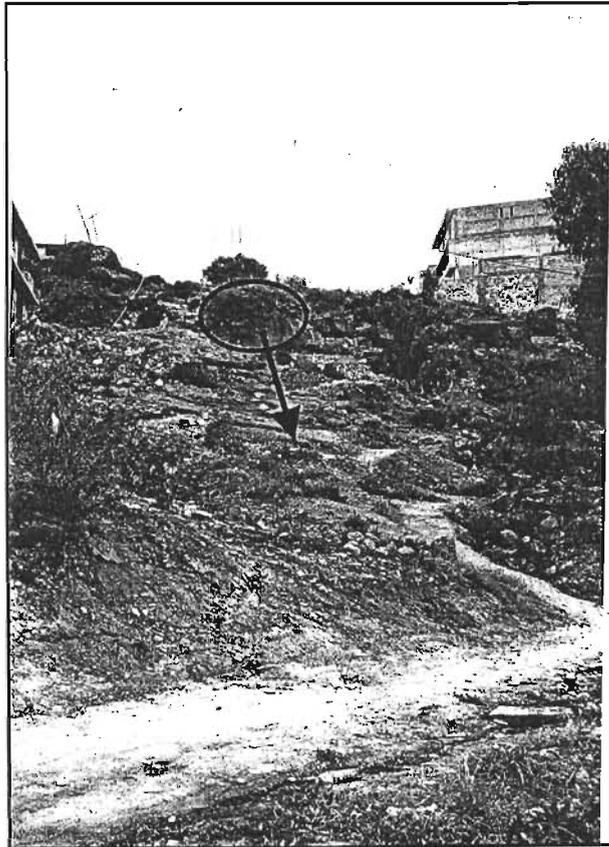


FICHA PARA LOS MECANISMOS DE FALLA

COORDENADAS EN UTM	494.089	2,162,921
CARACTERISTICAS DEL BLOQUE		
Dimensiones	Largo	2.5
	Ancho	2.5
	Altura	2
	Forma	Esferica
MECANISMO DE FALLA	Caída secundaria	

OBSERVACIONES

En la fotografía se aprecia un bloque de roca que puede presentar falla por rodamiento, si se sigue erosionando la base. La roca podría afectar a personas u otras viviendas que se encuentran pendiente abajo. La flecha indica la dirección del movimiento del bloque.



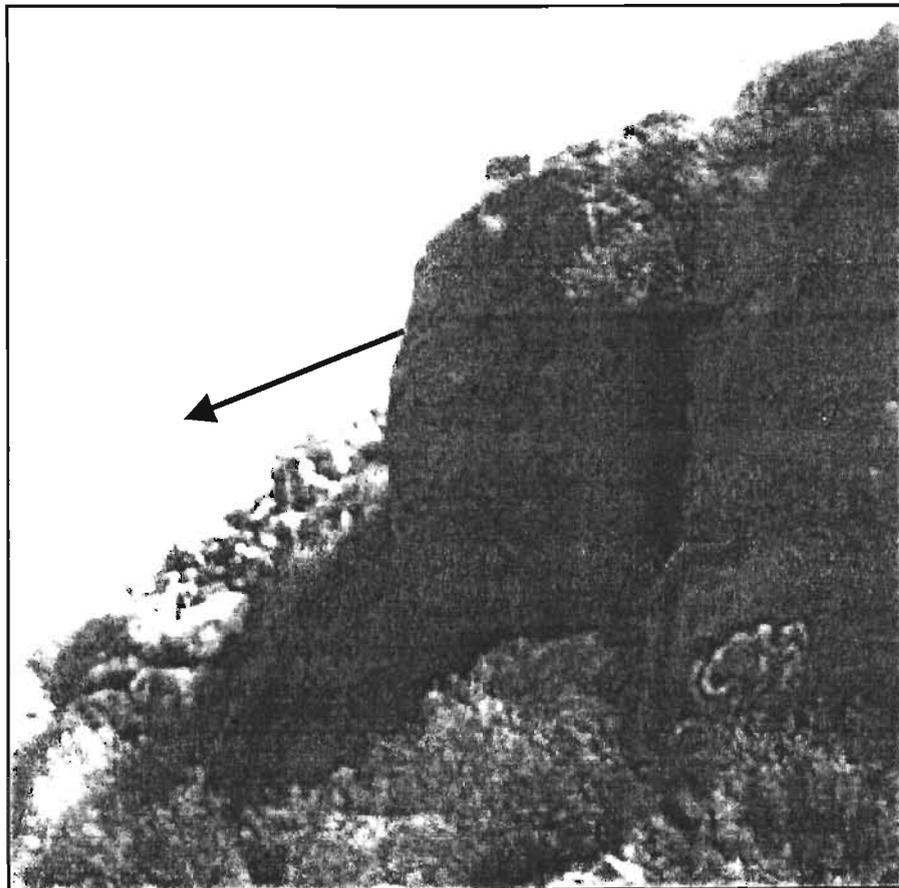
FICHA PARA LOS MECANISMOS DE FALLA

COORDENADAS EN UTM	492.853	2,164,380
Dimesiones	CARACTERISTICAS DEL BLOQUE	
	Largo	2.5
	Ancho	3.5
	Altura	5
	Forma	Rectangular
MECANISMO DE FALLA	Volteo singular	

OBSERVACIONES

Se trata de un talud con discontinuidades verticales, lo cual hace que se presente el mecanismo de falla por volteo. A este talud le afecta el relleno y el agua que entra en la fractura porque provoca un empuje hidrostático haciéndolo más inestable.

La flecha indica la dirección del movimiento del bloque.



FICHA PARA LOS MECANISMOS DE FALLA

COORDENADAS EN UTM	494,089	2,162,921
CARACTERISTICAS DEL BLOQUE		
Dimensiones	Largo	2.5
	Ancho	6
	Altura	2
	Forma	Rectangular
MECANISMO DE FALLA	Falla en cuña	

OBSERVACIONES

En la fotografía se observa un talud muy fracturado que presentando falla en cuña, estas pueden afectar a las casas que se están asentando en el pie del talud. Se observan marcas de agua en el talud lo cual indica que fue el factor detonante de la falla.

